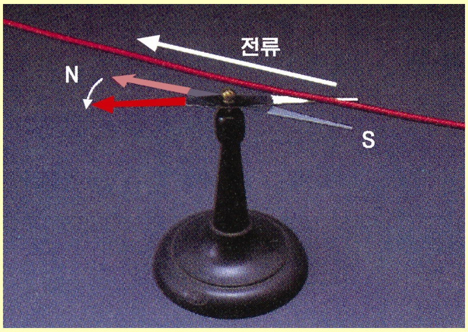
차 례



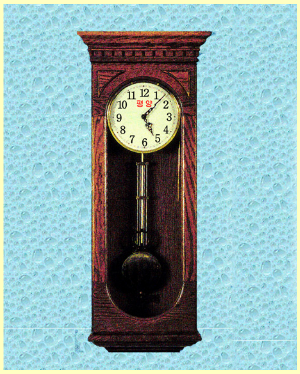


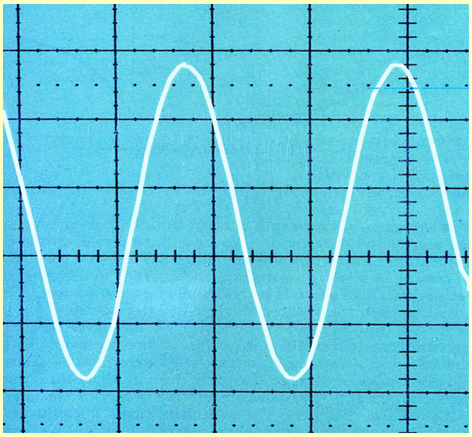

전류
N
S

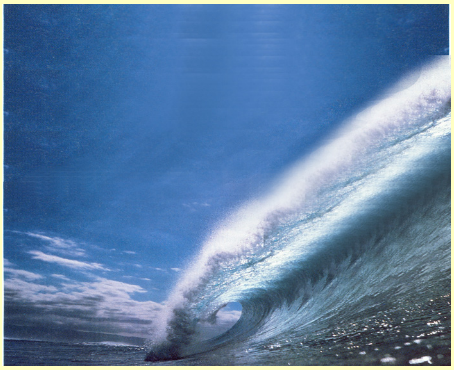














실 험 325

참고

자료

일화

머 리 말

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《현시대는 과학과 기술의 시대, 콤퓨터시대입니다.》

위대한 령도자 **김정일**대원수님의 유훈을 높이 받들고 오늘 우리 나라에서는 과학과 기술이 끊임없이 발전하고있으며 인민경제와 사회생활의 모든 분야를 콤퓨터화, 정보화하는데서 비약적인 성과를 이룩하고있다.

정보산업시대를 추동하고있는 최신과학과 기술의 눈부신 성과들은 물리학의 원리와 그 응용을 떠나서는 생각할수 없다.

정보산업시대에 맞는 능력있는 인재로 준비하기 위해서는 모든 학생들이 기초과학의 한 분과인 물리학에 대한 깊은 지식을 소유하여야 하며 그것을 능숙하게 활용할줄 아는 재능을 가져야 한다.

5학년 물리에서는 물리학의 중요한 내용들인 전기학, 류체력학, 강체력학 및 진동학과 파동학의 가장 보편적이며 일반적인 지식을 배우게 된다.

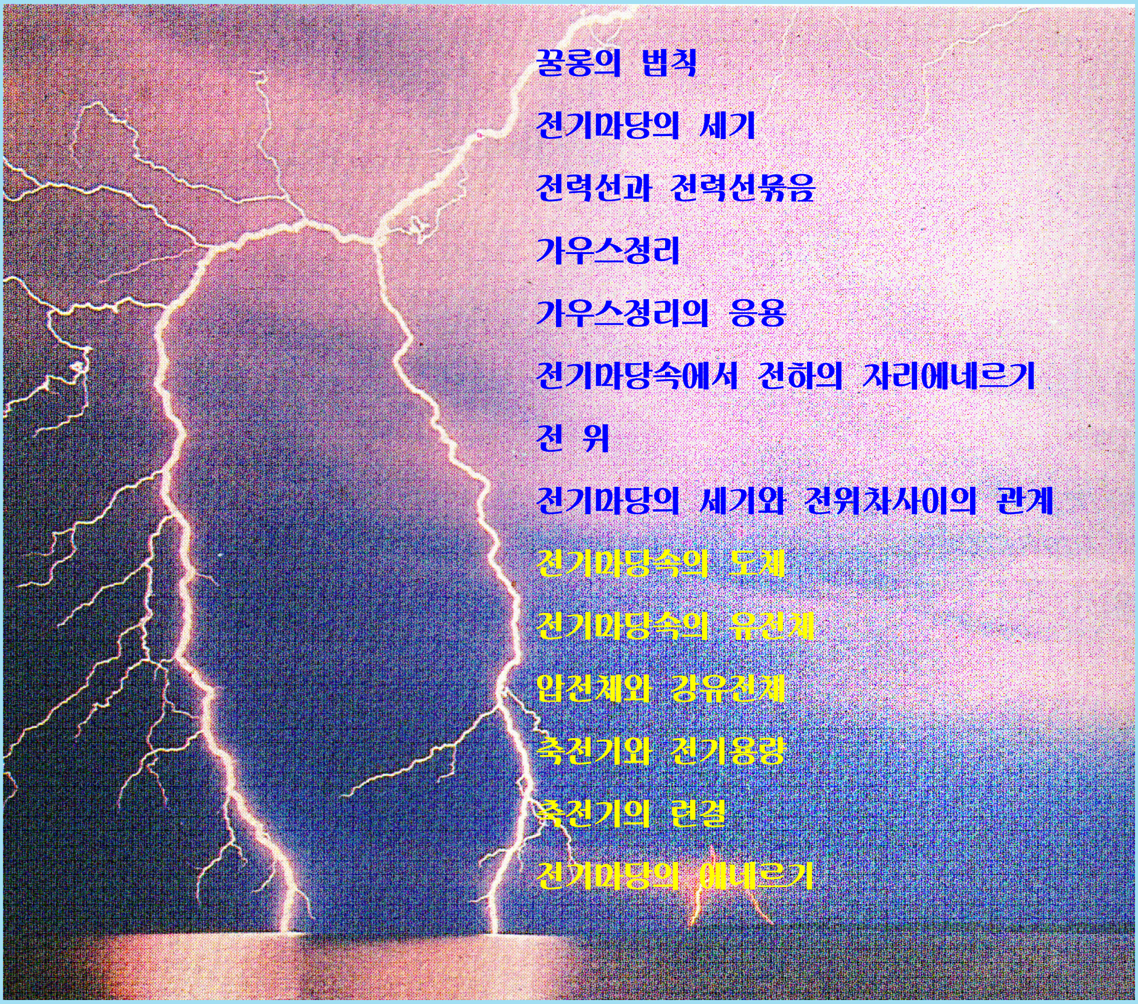
학생들은 물리학습을 깊이있게 열심히 하여 위대한 장군님께서 바라시던 재능있는 혁명인재로 튼튼히 준비함으로써 경애하는 **김정은**선생님의 령도따라 사회주의강성국가를 건설하는데 적극 이바지해나가야 한다.

제 1 장. 전기마당

전기를 떠나서는 우리의 오늘과 같은 문명한 생활을 생각할수 없다. 공장과 농촌들에서는 어렵고 힘든 일을 전기가 대신하며 전기의 혜택으로 먼곳에 있는 사람과 말을 주고받을수 있고 그곳 소식도 눈으로 직접 볼수 있다. 일상생활에서뿐만아니라 인민경제 모든 부문에서 전기를 쓰지 않는 곳이 없으며 전기에 의해 우리의 생활은 더욱더 문명해지고 윤택해지고있다.

전기마당에 대한 지식은 전기학의 전반내용을 리해하는데서 중요한 기초로 되며 과학과 기술의 여러 분야에서 널리 리용되고있다.

이 장에서는 전하가 만드는 전기마당의 기본성질과 법칙, 전기마당이 물질들에 주는 영향과 리용에 대하여 학습한다.



제 1 절. 꿀롱의 법칙

꿀롱의 법칙

대전된 물체는 전기를 띠였다고 말한다. 물체가 띠고있는 전기를 **전하**라고 부르며 전하가 많은가 적은가 하는것은 **전기량**으로 나타낸다. 실례로 전자는 1.6×10^{-19} C의 전기량을 가지는 음전하이다.

자연계에는 오직 두가지 전하 즉 양전하와 음전하만이 있으며 이 전하들에 의해 모든 전기적현상들이 일어난다. 대전체들사이의 거리에 비해 그것들의 크기가 매우 작은 경우에는 이 대전체들을 **점전하**라고 부른다.

생각하기 점전하와 질점의 공통점과 차이점은 무엇인가?

꿀롱은 1785년에 그림 1-1과 같은 꼬임저울을 리용하여 진공속에서 두 점전하들사이에 작용하는 힘에 관한 법칙을 발견하였다.

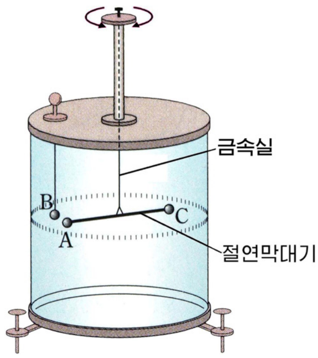


그림 1-1. 꼬임저울

구 A와 B에 전하를 주면 이것들은 호상작용하므로 절연막대기가 회전하면서 금속선이 꼬이게 된다. 금속선이 꼬이는 정도는 구들의 호상작용힘과 관련되므로 꼬임각을 재여 두 구사이에 호상작용하는 힘을 알아낼수 있다.

꿀롱이 실험으로 밝혀낸 결과는 다음과 같다.

진공속에서 멎어있는 두 점전하사이에 작용하는 전기힘의 크기는 점전하들사이의 거리 r의 두제곱에는 거꿀비례하고 그것들의 전기량 q_1와 q_2의 적에는 비례한다. 이것을 **꿀롱의 법칙**이라고 부른다.

참고 **꿀롱의 법칙의 벡토르표시**

꿀롱의 법칙을 다음과 같은 벡토르형식으로도 표시할수 있다.

$$\vec{F}=k\frac{q_1q_2}{r^2}\cdot\frac{\vec{r}}{r}$$

여기서 $\vec{r}$는 한 점전하로부터 다른 점전하(힘을 따지려는 전하)까지 그은 자리벡토르이다.(그림 1-2) 그리고 $\vec{r}/r$는 크기는 1이고 방향은 $\vec{r}$와 같은 단위벡토르이다.

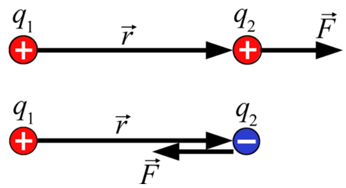


그림 1-2. 전기힘의 방향

꿀롱의 법칙을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

<u>전기힘의 방향은 두 점전하를 련결하는 직선우에 놓이며 전하들의 부호가 같을 때에는 밀힘으로, 다를 때에는 끌힘으로 나타난다.</u>

정밀한 실험에 의하면 k의 값은 진공속에서

$$k=8.988\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}\approx9\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}$$

이다. 공기속에서도 k의 값은 거의나 이와 비슷하다.

흔히 $1/4\pi\varepsilon_0$ 으로 k를 대신한다. 이때 상수 ε_0 의 값은

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi\times8.988\times10^9} \approx 8.85\times10^{-12}\ (\mathrm{C^2/(N\cdot m^2)})$$

로 된다. ε_0 을 **전기상수**라고 부른다. $1/4\pi\varepsilon_0$ 으로 꿀롱의 법칙을 표시하면 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_1 q_2}{r^2}$$ **꿀롱의 법칙**

점전하들사이에 작용하는 전기힘을 **꿀롱힘**이라고도 부른다.

생각하기 꿀롱의 법칙과 만유인력법칙의 공통점과 차이점은 무엇인가?

자료 전자복사기

전자복사기는 문서를 빠른 시간동안에 그대로 찍어내는 복사장치이다.

전자복사기에서 중요한 부분은 걸면전체가 ＋전하로 대전된 회전원통이다. 어두운 곳에서 이 원통을 회전시키면서 원통걸면우에 복사하려는 문서를 빛으로 비쳐준다. 이때 문서의 흰 부분(글이나 그림이 찍히지 않은 부분)만을 빛이 통과해나가서 원통걸면우의 ＋전하들을 방전시킨다.

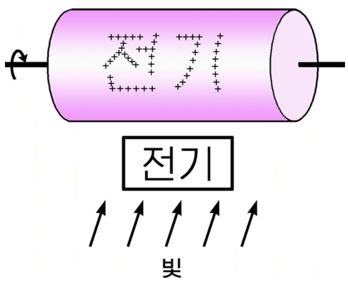
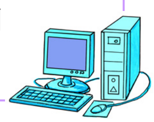


그림 1-3. 전자복사기

그러면 원통걸면에는 문서의 내용과 꼭같은 모양을 가진 부분들에만 ＋전하들이 남게 된다.(그림 1-3)

이 상태에서 －로 대전된 잉크알갱이들을 원통걸면우에 접촉시키면 이것들은 꿀롱힘을 받아 원통걸면우에 남아있는 ＋전하들에 끌리여 가붙게 된다.

다음 ＋전하로 세게 대전된 복사종이우로 원통이 한바퀴 회전하면 잉크알갱이들은 더 큰 끌힘이 작용하는 복사종이에로 끌리여 가게 되며 가열과정에 종이에 녹아붙는다. 결과 문서의 내용이 다른 종이에 복사되게 된다.



전기량보존법칙

+전하를 띤 물체에 그와 전기량이 같은 −전하를 주면 물체의 전기량은 령으로 된다. 즉 대전되지 않는다.

이것은 대전되지 않은 물체에는 전기량이 꼭같은 +전하와 −전하가 동시에 존재하고있다는것을 보여준다. 한편 전기를 띠지 않은 두 물체를 비비면 한 물체에서 다른 물체에로 전자들이 넘어가면서 대전된다.(그림 1-4) 그러므로 두 물체는 부호는 다르지만 같은 전기량으로 대전된다.

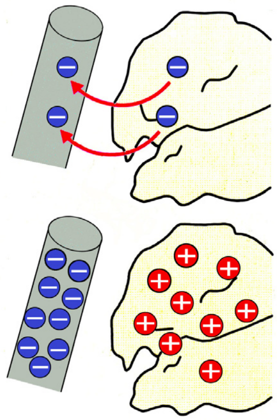


그림 1-4. 마찰에 의한 대 전

물체가 전기를 띤다는것은 그 어디에도 없던 전하가 새로 생겨나는것이 아니라 다른 물체에 이미 있던 전하를 넘겨받든가 아니면 자기에게 있던 전하를 다른 물체에 넘겨준 결과이다.

물체에 +전하가 −전하보다 많으면 +전기를 띠게 되고 반대인 경우에는 −전기를 띠게 된다.

이로부터 다음과 같은 결론을 얻을수 있다.

전하는 한 물체에서 다른 물체에로 또는 물체의 한쪽에서 다른쪽으로 이동할뿐 새로 생겨나지도 없어지지도 않는다. 이것을 **전기량보존법칙**이라고 부른다.

전기량보존법칙은 자연계의 중요한 법칙들중의 하나이다.

[례제] 수소원자의 핵인 양성자는 질량이 1.67×10^{-27} kg이고 전기량은 1.6×10^{-19} C이다. 두개의 양성자가 서로 1m 거리에 떨어져있을 때 작용하는 전기힘과 만유인력의 크기를 비교하여라.

풀이. 주어진것: $m_1=m_2=1.67\times10^{-27}$ kg

$q_1=q_2=1.6\times10^{-19}$ C

$r=1$m

구하는것: $F_{전}$?, $F_{만}$?

꿀롱의 법칙으로부터 두 양성자사이에 작용하는 전기힘의 크기는 다음과 같다.

$$F_{전}=k\frac{q_1q_2}{r^2}=9\times10^9\times\frac{(1.6\times10^{-19})^2}{1^2}\approx2.3\times10^{-28}\ (\text{N})$$

한편 만유인력법칙으로부터 두 양성자사이에 작용하는 만유인력의 크기는 다음과 같다.

$$F_{만}=G\frac{m_1m_2}{r^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{(1.67\times10^{-27})^2}{1^2}\approx1.9\times10^{-64}\ (\text{N})$$

보다싶이 전기힘은 만유인력의 10^{36}배정도로서 두 힘을 비교해볼 때 전기힘이 훨씬 크다.

문 제

1. 4.8×10^{-6}C으로 대전된 금속구와 -3×10^{-6}C으로 대전된 금속구가 9cm 거리에 떨어져있다. 이것들사이에 작용하는 전기힘의 크기를 구하고 힘의 방향을 지적하여라.
2. 같은 부호로 대전된 두개의 꼭같은 금속구가 일정한 거리에 떨어져있다. 이때 두 금속구의 전기량의 비는 3:1이고 작용하는 힘은 F_1이다. 두 구를 접촉시켰다가 다시 본래자리에 가져다놓으니 호상작용힘이 F_2로 되였다. F_1와 F_2의 비를 구하여라.
3. 질량이 1×10^{-3}kg인 구 A를 $q_A = -1\times10^{-8}$C으로 대전시켜 가벼운 실에 매달았다. 이제 +전하로 대전된 구 B를 구 A에 가까이 가져가니 구들사이의 거리는 0.1m로 되고 실은 드림선과 30°의 각으로 기울어졌다.(그림 1-5) 두 구사이에 작용하는 전기힘과 구 B의 전기량을 구하여라.

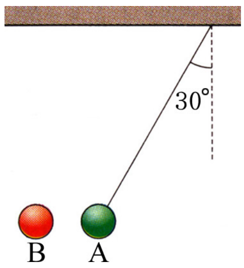


그림 1-5

제 2 절. 전기마당의 세기

전기마당

끈에 철구를 매달고 휘돌릴 때 손이 구에 주는 힘은 끈을 통하여 전달된다.

? 그러면 서로 떨어져있는 두 전하사이에 주고받는 전기힘은 무엇을 통하여 전달되는가.

두 전하사이에는 반드시 힘을 전달하는 그 어떤 물질이 있어야 한다.

영국의 물리학자 파라데이는 전하주위의 공간에는 전기힘을 전달할수 있는 그 어떤 특수한 물질이 존재하며 여기에 다른 전하가 놓일 때 전기힘이 미친다고 보았다.

전기힘을 전달하는 공간을 **전기마당**이라고 부른다.

전하주위에는 항상 전기마당이 존재하면서 이것을 통하여 다른 전하와 서로 힘을 주고받는다. 전기마당은 눈에 보이지 않는다. 그러나 전기마당속에 가져다놓은 전하들에 힘을 주는것을 통하여 자기의 존재를 나타낸다.

어떤 전하가 전기힘을 받으면 그곳에는 전기마당이 있고 받지 않으면 전기마당이 없다.



진공(그 무엇도 없는 공간)과 전기마당은 다 눈에 보이지 않는다. 그런데 어떤 차이가 있겠는가?

전기마당의 세기

전하 q가 만드는 전기마당속에 점전하 q_0을 여러곳에 한번씩 가져다놓았다고 하자. 꿀롱의 법칙으로부터 쉽게 알수 있는것처럼 q_0이 받는 힘의 크기와 방향은

위치마다 다르다.(그림 1-6) 이것은 전기마당의 세기와 방향이 위치마다 다르다는것을 보여준다.

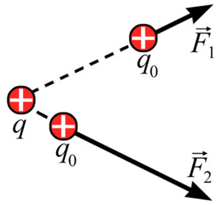


그림 1-6. 전기마당속에서 점전하가 받는 힘의 크기와 방향

❓ 그러면 전기마당의 이러한 특성을 어떤 량으로 표시하겠는가.

다른 전하가 만드는 전기마당을 변화시키지 않을 정도로 전기량이 작은 양전하를 띤 점전하를 **시험전하**라고 부르며 흔히 q_0으로 표시한다. 시험전하가 받는 힘을 가지고 전기마당의 주어진 점을 평가할수 있다.

전기마당속에 놓여있는 시험전하 q_0이 받는 전기힘벡토르가 $\vec{F}$라고 하자. 이때 $\vec{F}$를 q_0으로 나눈 값은 q_0의 전기량에는 관계없이 오직 그것이 놓여있는 곳의 전기마당에만 관계된다. 이 값을 **전기마당의 세기**라고 부르며 이것으로서 주어진 점의 전기마당이 센가 약한가 그리고 어느 방향으로 향하는가를 나타낸다. 전기마당의 세기를 $\vec{E}$로 표시하면 다음과 같다.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \qquad \text{전기마당의 세기}$$

전기마당의 세기는 단위양전하(+1C)가 받는 전기힘과 크기와 방향이 같은 량이다. 전기마당의 방향은 양전하가 받는 전기힘의 방향으로 약속한다. 그러므로 전기마당속에서 양전하는 전기마당방향으로 전기힘을 받고 음전하는 그 반대방향으로 전기힘을 받는다.(그림 1-7)

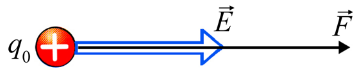


그림 1-7. 전기마당의 세기

전기마당의 세기의 단위는 1N/C이다. 1N/C은 1C의 전하가 받는 전기힘이 1N인 전기마당의 세기이다.

전기마당의 세기가 $\vec{E}$인 전기마당속에서 전하 q_0이 받는 전기힘의 크기는

$$F = q_0 E$$

로서 구해진다.

❓ 그러면 점전하 q가 만드는 전기마당의 세기는 어떻게 표시되겠는가.

이를 위해 전하 q로부터 r만큼 떨어진 곳에 시험전하 q_0을 놓자. 이때 q_0이 받는 전기힘의 크기는 꿀롱의 법칙으로부터

$$F = k\frac{qq_0}{r^2}$$

이다. 따라서 전기마당의 세기의 정의로부터 점전하 q로부터 r만큼 떨어진 점에서의 전기마당의 세기는 다음과 같다.

$$E = \frac{F}{q_0} = k\frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q}{r^2} \qquad \text{점전하가 만드는 전기마당의 세기}$$

이처럼 점전하가 만드는 전기마당의 세기는 거리의 두제곱에 거꿀비례하여 작아진다.(그림 1-8) 그리고 이때 양전하가 만드는 전기마당의 방향은 점전하로부터 멀어지는쪽으로 향한다.

음전하의 마당속에서 시험전하가 받는 힘의 방향은 양전하의 마당에서와 반대로 된다. 그러므로 음전하가 만드는 전기마당의 세기는 양전하와 꼭같이 표시되지만 방향은 반대로 된다.

전기마당의 세기가 시간에 따라서 변하지 않는 마당을 **정전기마당**이라고 부르며 마당의 모든 점에서 전기마당의 세기와 방향이 다같은 마당을 **고른전기마당**이라고 부른다.

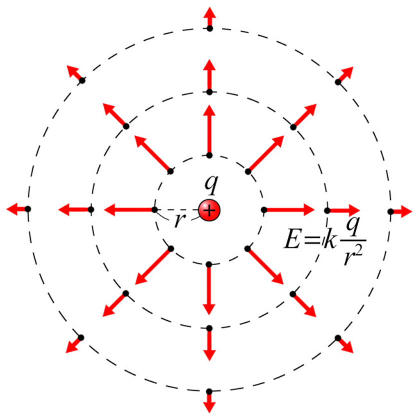


그림 1-8. 거리에 따르는 전기마당의 세기

생각하기 점전하의 전기마당은 어떤 경우에 변하겠는가?

중첩의 원리

두개이상의 전하들이 만드는 전기마당의 세기는 어떻게 표시되겠는가.

두 점전하 q_1와 q_2이 동시에 만드는 전기마당속에 시험전하 q_0을 놓으면 이것이 받는 전기힘은

$$\vec{F}=\vec{F}_1+\vec{F}_2$$

과 같다. 따라서 q_0이 놓인 곳의 전기마당의 세기는

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q_0}=\frac{\vec{F}_1+\vec{F}_2}{q_0}=\frac{\vec{F}_1}{q_0}+\frac{\vec{F}_2}{q_0}=\vec{E}_1+\vec{E}_2$$

로 된다. 즉

$$\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2$$

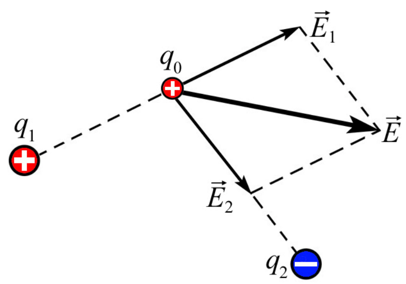


그림 1-9. 중첩의 원리

이다.(그림 1-9) 두개이상의 점전하가 만드는 전기마당의 세기도 마찬가지로 계산된다. 일반적으로 n개의 점전하가 만드는 전기마당의 세기는 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2+\cdots+\vec{E}_n=\sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i \qquad \text{중첩의 원리}$$

그러므로 다음과 같이 말할수 있다.

여러개의 전하들이 어떤 점에 만드는 전기마당의 세기는 개별적전하들이 이 점에 만드는 전기마당의 세기의 벡토르합과 같다. 이것을 전기마당세기의 **중첩의 원리**라고 부른다.

점전하가 아닌 일정한 크기를 가진 대전체가 만드는 전기마당의 세기는 어떻게 구해야 하겠는가.

이때에는 대전체를 점전하로 볼수 있을 정도로 매우 작게 쪼개고 이것들이 만드는 전기마당의 세기를 중첩의 원리에 의해 모두 합하면 된다.(그림 1-10)

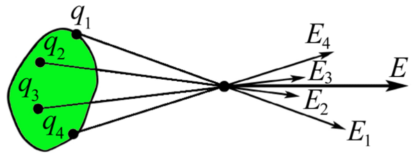


그림 1-10. 대전체가 만드는 전기마당

[례제] 전기량의 크기는 같지만 부호가 반대인 두 점전하 $+q$와 $-q$가 서로 r만큼 떨어져있다. 두 전하를 련결하는 직선우의 중심 P에서 전기마당의 세기를 구하여라.(그림 1-11)

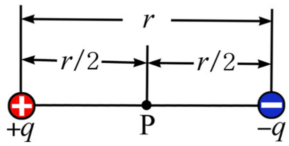


그림 1-11

풀이. 매개 전하들에서 P점까지의 거리는 모두 $r/2$이다. $+q$가 P점에 만드는 전기마당의 세기는 크기가

$$E_1 = k\frac{q}{(r/2)^2} = 4k\frac{q}{r^2}$$

이며 $-q$쪽으로 향한다. 그리고 $-q$가 P점에 만드는 전기마당의 세기도 역시 크기가

$$E_2 = 4k\frac{q}{r^2}$$

이며 $-q$쪽으로 향한다.

따라서 중첩의 원리에 의해 P점에서의 전기마당의 세기는 다음과 같다.

$$E = E_1 + E_2 = 8k\frac{q}{r^2}$$

답. $8k\dfrac{q}{r^2}$

문 제

1. -5×10^{-6}C의 점전하가 그로부터 0.3m 떨어진 점에 만드는 전기마당의 세기를 구하고 방향을 지적하여라.
2. 거리가 80cm만큼 떨어져있는 두 점에 전기량이 다같이 -5×10^{-6}C인 －전하들이 각각 놓여있다. 이때 이 점들로부터 각각 50cm 거리에 있는 곳에서 전기마당의 세기를 구하여라.
3. 변의 길이가 0.6m인 바른3각형의 두 정점에 전기량이 각각 2×10^{-10}C, -2×10^{-10}C인 두 점전하가 놓여있다. 이 3각형의 나머지 정점에서 전기마당의 세기를 구하여라.

제 3 절. 전력선과 전력선묶음

전 력 선

전기마당은 실지 존재하지만 눈에 보이지도 않고 손으로 만질수도 없다. 그러면 이와 같은 전기마당을 어떻게 그림으로 표시하겠는가.

실 험

○ 종이고뿌를 뒤집어놓아 밑면이 우로 올라가게 한다. 여기에 변압기기름(또는 피마주기름)을 얇게 붓는다.(그림 1-12)

○ 기름우에 짧게 자른 머리카락들을 골고루 뿌린다.

○ 이가운데에 압정을 뒤집어놓고 여기에 전하를 준다.

○ 대전된 압정주위의 머리카락들이 어떻게 배렬되는가를 관찰한다.

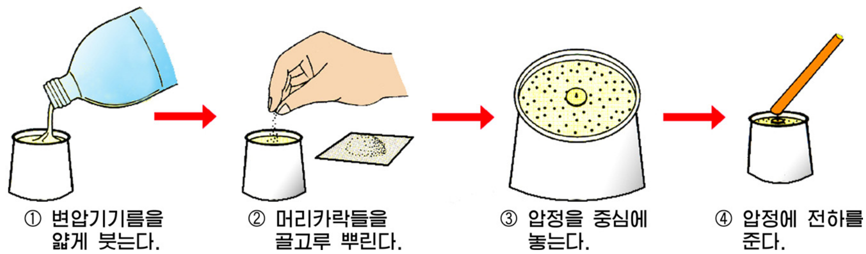


그림 1-12. 전력선보이기실험

실험에서 기름우에 뜬 머리카락들은 대전된 압정이 만드는 전기마당에 의해서 전기마당방향으로 배렬되면서 어떤 선을 이룬다.(그림 1-13)

이것을 통해 전기마당을 어떤 선으로 표시할수 있다는것을 알수 있다. 이러한 리치로부터 전기마당을 전력선이라는 어떤 선을 가지고 직관적으로 표시할수 있다.

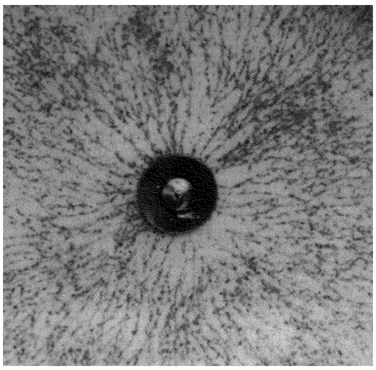


그림 1-13. 전 력 선

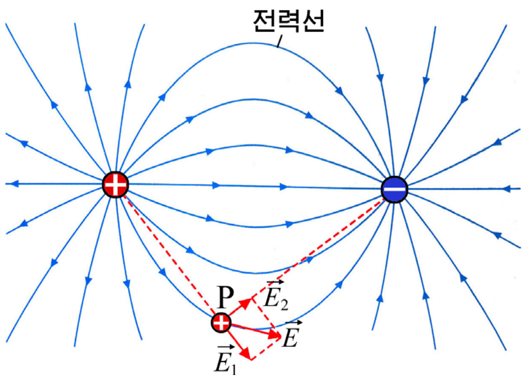


그림 1-14. 전기마당의 방향

그 선우의 매 점에서 그은 접선방향이 바로 그 점에서의 전기마당의 방향과 일치하는 방향을 가지는 곡선을 **전력선**이라고 부른다.

따라서 전력선은 전기마당의 매 점에서 전기마당의 방향을 지적해주는 곡선으로 된다.(그림 1-14)

⚠ 전력선은 실제 존재하는 선이 아니라 전기마당을 직관적으로 표시하기 위하여 끌어들인 가상적인 선이다.

그림 1-15에는 각이한 전하들이 만드는 전기마당의 전력선들이 그려져있다.

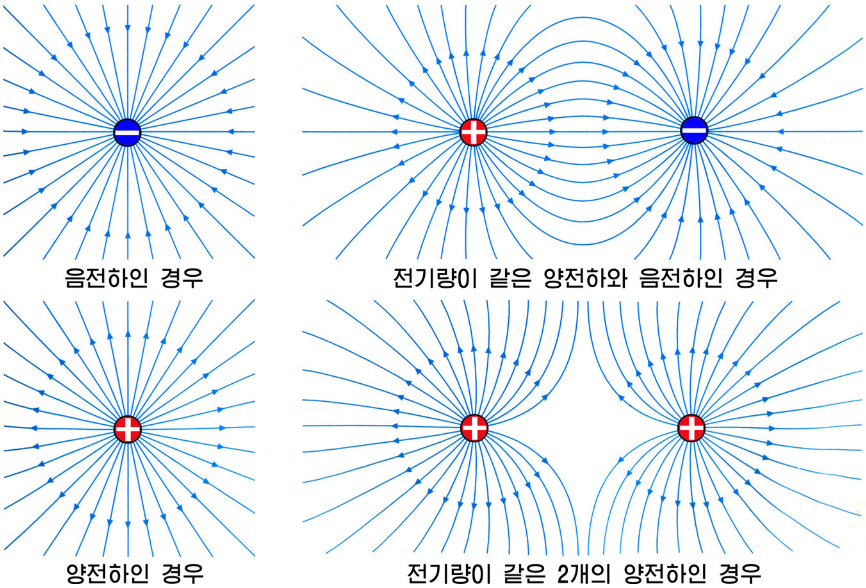


그림 1-15. 각이한 전하들이 만드는 전기마당의 전력선

그림에서 알수 있는것처럼 전력선은 양전하에서 시작되여 음전하에서 끝나거나 먼곳으로 뻗어나간다. 그리고 먼곳에서 뻗어들어와 음전하에서 끝난다.

⚠ 전력선은 절대로 사귈수 없으며 각을 지어 꺾일수도 없다.



전력선은 왜 사귈수 없으며 각을 지어 꺾일수 없는가?

전력선묶음

전하주위의 모든 점에는 다 전기마당이 존재한다. 그렇다고 하여 전력선을 다 그릴수는 없다.

전력선들을 그릴 때에는 전기마당의 주어진 곳에서 마당방향에 수직인 어떤 면을 지나는 전력선수가 바로 그곳에서의 전기마당의 세기에 비례하도록 그린다.

전기마당속의 주어진 면을 지나는 전력선의 수와 크기가 같은 량을 **전력선묶음**이라고 부른다.

전기마당의 세기가 E인 곳에서 그에 수직인 면적 S_0을 지나는 전력선묶음은 다음과 같다.

$$N = ES_0 \quad \text{전력선묶음}$$

여기서 S_0은 그 면내에서는 전기마당의 세기와 방향이 일정하다고 볼수 있는 면적이다. $S_0=1\text{m}^2$인 때 $N=E$이다.

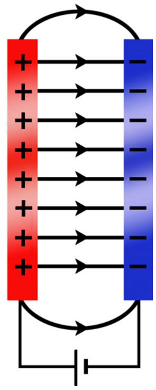
그러므로 전기마당방향에 수직인 단위면적을 지나는 전력선묶음의 크기는 바로 그곳에서의 전기마당의 세기와 크기가 같다.

이로부터 다음과 같은것을 알수 있다.

전기마당의 세기가 센 곳에서는 전력선이 배고 약한 곳에서는 성글다.

전력선이 밴가 성긴가를 보고 전기마당의 세기를 비교할 수 있다.

※ 어떤 면을 지나는 전력선묶음은 그 면을 지나는 전력선의 수와 크기가 같은 량이지 전력선의 수는 아니다. 왜냐하면 전력선묶음의 단위가 $1\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}$로서 본이 없는 수의 단위와는 다르기때문이다. 그러나 두 량은 크기가 같기때문에 《어떤 면을 지나는 전력선묶음》, 《어떤 면을 지나는 전력선의 수》라는 말을 함께 쓴다.


그림 1-16. 고른전기마당의 전력선

고른전기마당에서는 전기마당의 세기와 방향이 모든 곳에서 같기때문에 전력선은 등간격으로 놓이는 평행선들로 된다.(그림 1-16)

서로 반대부호로 대전된 두개의 넓은 평판대전체의 사이에는 변두리를 제외하고는 고른전기마당이 존재한다.

전기마당에 수직이 아닌 임의의 면적 S를 지나는 전력선묶음을 구해보자.

그림 1-17에서 알수 있는것처럼 임의의 면 S를 지나는 전력선묶음은 전기마당에 수직인 면 S_0을 지나온 전력선묶음과 같다. 따라서 S면을 지나는 전력선묶음은 다음과 같다.

$$N=ES_0=ES\cos\theta$$

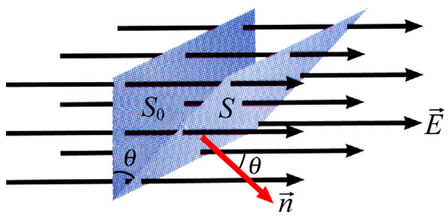


그림 1-17. 전력선묶음의 계산

여기서 θ는 면 S에 수직이면서 전력선이 나가는쪽으로 향하는 단위벡토르를 $\vec{n}$이라고 할 때 $\vec{E}$와 $\vec{n}$사이의 각이다.

따라서 면을 지나 밖으로 나가는 전력선에 대해서는 θ가 항상 $\pi/2$보다 작으므로 $N>0$으로 되고 들어오는 전력선에 대해서는 θ가 항상 $\pi/2$보다 크므로 $N<0$으로 된다. 그러므로 어떤 면을 뚫고나가는 전력선묶음은 +, 들어오는 전력선묶음은 －의 값을 가진다.



그림 1-15에서 전기량이 같은 두개의 양전하가 만드는 전기마당에서 가운데부분에는 전력선이 그려져있지 않다. 이것은 무엇을 보여주는가?

문 제

1. 전기량이 1×10^{-6}C인 점전하가 있다. 그로부터 0.1m 떨어진 곳과 0.3m 떨어진 곳에서 전력선에 수직인 같은 면적의 요소면을 지나는 전력선묶음의 비를 구하여라.
2. 그림 1-18에서 실선은 전기마당의 전력선이다. 그리고 점선은 어떤 속도를 가지고 점 1에 입사하는 두 점전하 A와 B의 운동자리길이다. 두 점전하의 전기량부호를 결정하여라.

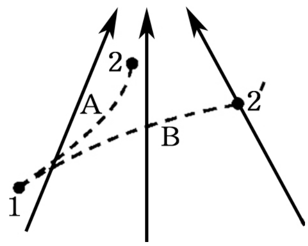


그림 1-18

3. 우의 문제에서 전하 B의 1점과 2′점에서의 가속도는 각각 a_1, a_2이고 운동에네르기는 K_1, K_2이다. 다음의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $a_1>a_2$이며 $K_1>K_2$이다.　　ㄷ) $a_1<a_2$이며 $K_1>K_2$이다.
ㄴ) $a_1>a_2$이며 $K_1<K_2$이다.　　ㄹ) $a_1<a_2$이며 $K_1<K_2$이다.

제 4 절. 가우스정리

한개의 점전하에서는 얼마만한 전력선묶음이 나오겠는가.

전기마당은 전하들이 만드므로 전력선묶음도 전하의 전기량과 일정한 관계를 가지게 된다.

한개 점전하를 둘러싸는 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음

점전하 q의 전기마당속에서 q를 중심으로 하고 반경이 r인 구면 S를 생각하자.(그림 1-19) 이때 점전하에서 나오는 전력선은 모두 이 구면을 지난다.

이 구면을 지나는 전력선묶음을 계산해보자.

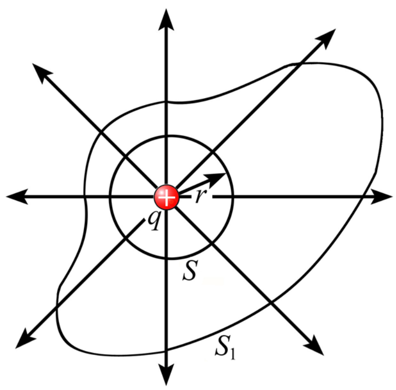


그림 1-19. 한개의 점전하를 둘러싼 닫긴곡면

구면 S 우의 모든 점에서 전력선은 구면에 수직이다. 그러므로 구면우의 어떤 요소면 ΔS 를 지나는 전력선묶음은

$$\Delta N = E \cdot \Delta S = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \Delta S$$

이다. 따라서 구면전체를 지나는 전력선묶음은

$$N = \sum \Delta N = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \sum \Delta S = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

로 된다.

이처럼 점전하 q 로부터는 q/ε_0 만 한 전력선묶음이 나온다.(-전하로는 들어간다.)

그림 1-19에서 곡면 S_1와 같이 닫긴곡면이 임의의 모양을 가진다 하더라도 전력선이 그 어디에서도 끊기지 않으므로 S_1를 지나는 전력선묶음도 여전히 q/ε_0 이다.

그림 1-20과 같이 점전하를 둘러싸지 않는 닫긴곡면을 생각할 때 전력선들이 한쪽 면으로 들어왔다가(부의 전력선묶음) 모두 다른쪽 면으로 나가므로(정의 전력선묶음) 이 곡면을 지나는 전력선묶음의 총합은 령과 같다.

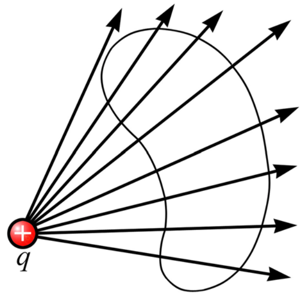


그림 1-20. 점전하를 둘러싸지 않는 닫긴곡면

여러개 점전하를 둘러싸는 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음

임의의 닫긴곡면안에 점전하 $+2q$ 와 $-q$ 가 있는 경우를 살펴보자.(그림 1-21)

이때 전하 $+2q$ 에서는 $2q/\varepsilon_0$ 개의 전력선묶음이 나오고 $-q$ 로는 q/ε_0 개의 전력선묶음이 들어간다. 그러므로 $2q$ 에서 나온 전력선묶음가운데서 q/ε_0 개의 전력선은 $-q$ 로 들어가고 나머지만 멀리로 뻗어나간다.

이 경우 멀리로 뻗어나가는 전력선묶음이 닫긴곡면을 지나는 전체 전력선묶음으로 된다. 일부 $-q$ 에서 끝나는 전력선들도 닫긴곡면을 지나지만 이것들은 닫긴곡면을 한번 지나서 나와 다시 들어가기때문에 전체 전력선묶음의 계산에서는 고려되지 않는다.

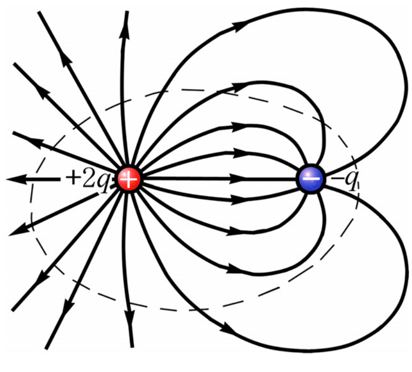


그림 1-21. 두개의 점전하를 둘러싼 닫긴곡면

그러므로 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음은 다음과 같다.

$$N = \frac{2q}{\varepsilon_0} - \frac{q}{\varepsilon_0} = \frac{2q + (-q)}{\varepsilon_0}$$

이처럼 두 점전하를 둘러싼 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음은 그안에 있는 두 전기량의 대수적합을 ε_0 으로 나눈 값과 같으며 그 값은 닫긴곡면의 모양에는 관계 없다.

마찬가지방법으로 전기량이 q_1, q_2, $\cdots$, q_n 인 여러개의 점전하들을 둘러싸는 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음은 $(q_1+q_2+\cdots+q_n)/\varepsilon_0$ 과 같으며 닫긴곡면의 모양에는 관계없다.

가우스정리

닫긴곡면을 지나는 전력선묶음과 전기량사이의 관계를 보면 다음과 같은것을 알 수 있다.

우선 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음은 그안에 있는 전기량들의 대수적합을 ε_0 으로 나눈 값과 같다. 그리고 그 값은 닫긴곡면밖에 있는 전기량에는 무관계하며 또한 닫긴곡면의 모양에도 무관계하다.

이로부터 다음과 같은 결론을 내릴수 있다.

임의의 모양을 가진 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음은 그안에 있는 전기량들의 대수적합을 ε_0 으로 나눈것과 같다. 이것을 **가우스정리**라고 부른다. 즉

$$N=\frac{q_1+q_2+\cdots+q_n}{\varepsilon_0} \qquad \text{가우스정리}$$

※ 대수적합이라는것은 닫긴곡면안에 음전하가 있으면 그의 전기량은 덜어야 한다는것을 의미한다.

[례제] 바른6면체의 중심에 점전하 q가 있을 때 그의 한 면을 지나는 전력선묶음을 구하여라.

풀이. 점전하 q에서는 q/ε_0 개의 전력선이 사방으로 고르롭게 분포되여나온다.

그러므로 바른6면체로 된 닫긴곡면을 지나는 전체 전력선의 수 즉 전력선묶음은

$$N=\frac{q}{\varepsilon_0}$$

이다. 한편 점전하 q가 바른6면체의 중심에 있으므로 한 면을 지나는 전력선묶음은

$$N'=\frac{N}{6}=\frac{q}{6\varepsilon_0}$$

답. $\frac{q}{6\varepsilon_0}$

문 제

1. 점전하 q가 바른6면체의 한 정점에 있을 때 한 면을 지나는 전력선묶음을 구하여라.
2. 어떤 닫긴곡면안에 있는 전기량들의 대수적합이 령일 때 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음도 령이다. 이때 닫긴곡면우에서의 전기마당의 세기도 령이겠는가?

제 5 절. 가우스정리의 응용

대전체에 전하들이 대칭으로 분포된 경우에는 가우스정리를 리용하여 대전체가 만드는 전기마당의 세기를 쉽게 구할수 있다.

구면전하의 전기마당

도체구에 전하를 주면 전하들은 구의 걸면에만 고르롭게 분포된다. 이런 대전체를 **구면전하**라고 부른다.

구면전하에서는 전하들이 구의 중심을 대칭점으로 하여 분포되여있으므로 이것이 만드는 전기마당의 전력선은 중심에서 퍼져나가는 해살모양을 띤다.(그림 1-22)

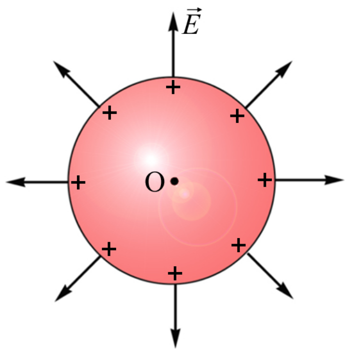


그림 1-22. 구면전하의 전력선

음전기를 띤 구면전하의 전력선은 모양은 같지만 방향이 반대이다.

전체 전기량이 q이고 반경이 R인 구면전하의 중심에서 $r(r>R)$만큼 떨어진 점에서의 전기마당의 세기를 가우스정리를 리용하여 구해보자.(그림 1-23)

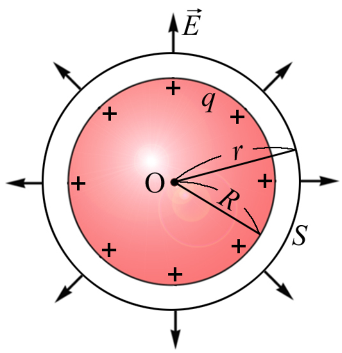


그림 1-23. 구면전하의 전력선계산

이를 위해 반경이 r인 구면 S를 닫긴곡면으로 잡고 이 곡면을 지나는 전력선묶음을 계산해보자.

구면전하의 전력선분포로부터 알수 있는것처럼 닫긴곡면의 모든 점들에서 전력선은 곡면에 수직이며 그 세기는 다 같다.

닫긴곡면 S우에서의 전기마당의 세기를 E라고 하면 곡면의 어떤 요소면적 ΔS를 지나는 전력선묶음은

$$\Delta N = E \cdot \Delta S$$

이다. 따라서 곡면 S를 지나는 전체 전력선묶음은

$$N = \sum \Delta N = \sum E \cdot \Delta S = E \cdot \sum \Delta S = E \cdot 4\pi r^2$$

으로 된다.

한편 가우스정리에 의하여 이 값은 곡면 S안에 있는 전체 전기량 q를 ε_0으로 나눈 값과 같아야 한다. 즉

$$E \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

따라서 구하려는 전기마당의 세기는 다음과 같다.

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q}{r^2}$$ **구면전하의 전기마당의 세기**

이처럼 구면전하가 구면밖에 만드는 전기마당의 세기는 구의 중심에 전체 전하가 집중되였다고 볼 때의 점전하가 만드는 전기마당의 세기와 같은 모양으로 표시된다.

무한평면전하의 전기마당

어떤 평면을 매우 가까이에서 고찰할 때 이 평면을 대단히 크다고 볼수 있다.



지구는 둥글다. 그러나 우리가 서있는 이 땅은 사방으로 매우 넓은 평면으로 보인다. 왜 그런가?

무한히 넓은 평면이 띠고있는 전하를 **무한평면전하**라고 부른다. 실천에서는 무한히 넓은 평면을 찾기 어렵다. 그러나 어떤 평면모양의 대전체를 그 가까이에서 고찰할 때 이 대전체를 무한평면전하로 볼수 있다.

무한평면전하에서는 그의 두께를 무시하고 문제를 고찰한다.

무한평면전하가 그 주위의 어떤 점에 만드는 전기마당은 사방으로 무한히 넓게 그리고 고르롭게 분포된 전하들이 만드는 전기마당의 합성이므로 전력선은 평면에 수직으로 되며 앞뒤로 뻗어나간다.(그림 1-24)

그림 1-24에서 A점에서의 전기마당을 C점과 그에 대칭인 D점에서 만드는 마당의 합성으로 볼 때 수평성분들은 상쇄되고 수직성분만 남는다.

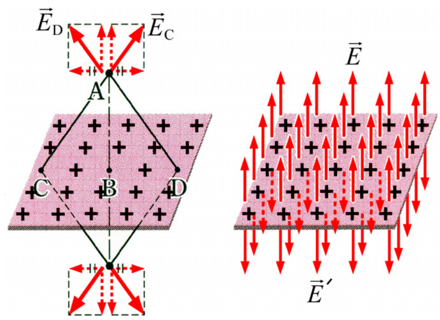


그림 1-24. 무한평면전하의 전력선



가우스정리에 의한 전기마당의 세기의 계산

가우스정리를 리용하여 대칭전하계의 전기마당을 구할 때에는 다음과 같이 한다.

먼저 전력선묶음을 계산하기 편리하게 닫긴곡면을 취한다.

이때 닫긴곡면우의 매 점에서 전기마당의 방향이 면과 수직 또는 수평이 되도록 닫긴곡면을 취한다.

다음 구하려는 전기마당의 세기를 E로 놓고 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음을 표시한다. 이것이 닫긴곡면안에 있는 전기량을 ε_0으로 나눈 값과 같다는 식을 얻은 다음 여기에서 E를 구한다.

이런 식으로 모든 대칭되는 점들이 만드는 마당들을 합성하면 A점에서 전기마당의 방향은 무한평면전하에 수직이 된다.

음전기를 띤 무한평면전하의 전력선은 모양은 같지만 방향이 반대이다.

평면전하의 전기량은 단위면적당 전기량인 **면전하밀도**로 표시한다.

면전하밀도 σ 로 고르롭게 대전된 무한평면전하로부터 r만큼 떨어진 곳에서의 전기마당의 세기를 가우스정리를 리용하여 구해보자.

이를 위해 평면으로부터 r만큼 떨어진 점에서의 전기마당의 세기를 E(구하려는 전기마당)라고 하자.

그리고 높이가 $2r$이고 밑면적이 ΔS 인 원기둥을 그림 1-25에서처럼 평면의 아래, 우에 수직되게 취하고 이 원기둥곡면을 지나는 전력선묶음을 계산하자.

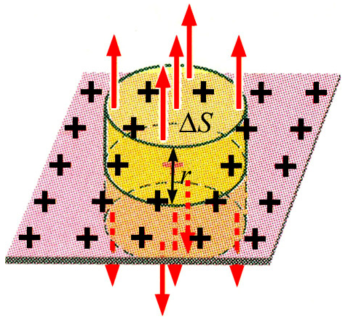


그림 1-25. 무한평면전하의 전력선계산

전력선은 평면에 수직이므로 원기둥옆면으로는 지나지 못하고 오직 밑면들로만 지나게 된다. 따라서 원기둥곡면을 지나는 전체 전력선묶음은 $N = 2E \cdot \Delta S$ 이다.

한편 원기둥곡면안에는 $\sigma \cdot \Delta S$ 만 한 전기량이 있으므로 가우스정리에 의해

$$2E \cdot \Delta S = \frac{\sigma \cdot \Delta S}{\varepsilon_0}$$

이다. 따라서 구하려는 전기마당의 세기는 다음과 같다.

$E = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}$	무한평면전하의 전기마당의 세기

보다싶이 웃식에는 r가 들어있지 않다.

그러므로 무한평면전하의 전기마당의 세기는 평면으로부터의 거리에는 무관계하다.

⚠ 보통 평면전하의 매우 가까운 곳에서는 전기마당의 세기가 $E = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}$ 으로 표시된다.

그림 1-26과 같이 면전하밀도 $+\sigma$, $-\sigma$ 로 고르롭게 대전된 두 무한평면전하의 전기마당의 세기를 구해보자.

그림에는 두 무한평면전하의 내부와 외부에서 개별적평면전하들이 만드는 전기마당의 세기벡토르가 표시되여있다.

보다싶이 두 평면전하의 외부에서는 두 전기마당의 방향이 반대이지만 내부에서는 일치한다. 그리고 무한평면전하의 전기마당의 세기가 모두 $|E_+| = |E_-| = \left|\dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}\right|$ 이므로

$$E_{외}=0, \quad E_{내}=\frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

로 된다. 이처럼 서로 반대부호로 대전된 두 무한평면전하의 외부에서는 전기마당이 존재하지 않고 내부에서만 존재한다. 이 전기마당의 세기는 평면내부에서 고르로우며 방향은 평면에 수직으로 향한다.

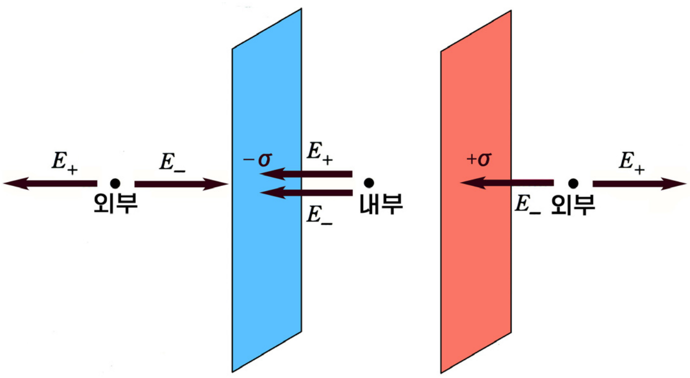


그림 1-26. 두 무한평면전하

문 제

1. 실험에 의하면 맑게 개인 날 지구겉면에는 방향이 우에서 땅면으로 향하고 세기가 200N/C인 전기마당이 있다. 지구를 구로 보고 지구가 띤 전기량을 구하여라. 지구의 반경은 6.4×10^6m이다.
2. 면적이 0.5m^2인 얇은 금속판에 4×10^{-9}C의 전하가 고르롭게 분포되여있다. 금속판 가까이에서 전기마당의 세기를 구하여라.
3. 가우스정리를 리용하여 구면전하안에서의 전기마당의 세기를 구하여라.
4. 반경이 R인 구속에 전기량 q가 고르롭게 분포되여있다. 이 경우 구속에서 반경이 $r(r<R)$인 구면을 생각할 때 이 구면을 지나는 전력선묶음은 얼마이겠는가?

제 6 절. 전기마당속에서 전하의 자리에네르기

전하는 전기마당속에서 전기힘을 받아 이동한다. 이때 전기마당은 전하에 대하여 일을 수행한다.

그러면 전기마당이 하는 일은 어떤 특성을 가지겠는가.

전기마당이 하는 일

고른전기마당 E속에서 점전하 q가 A점에서 B점까지 이동할 때 이 마당이 수행하는 일을 따지자.(그림 1-27) A점에서 B점까지 q가 이동할수 있는 자리길은 여러개가 있을수 있는데 여기서는 간단히 AB, ACB, ADB의 자리길을 따라서 이동하는 경우만을 고찰하자.

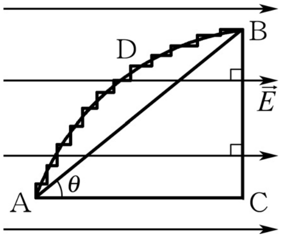


그림 1-27. 전하의 이동자리길

q가 받는 힘의 크기는 전기마당의 어디서나 $F=qE$이며 마당방향으로 향한다.

q가 AB자리길을 따라 이동할 때 전기마당이 수행하는 일은

$$A = F \cdot \mathrm{AB} \cdot \cos\theta = qE \cdot \mathrm{AC} \qquad (1)$$

이다. q가 ACB자리길을 따라 이동할 때에는 두 부분으로 갈라서 일을 계산할수 있다. 먼저 q가 AC자리길을 따라 이동할 때 수행한 일은 $A_1=qE \cdot \mathrm{AC}$이고 다음 CB자리길에서는 이동방향과 전기힘의 방향이 수직이므로 전기힘은 일을 수행하지 못한다. 즉 $A_2=0$이다. 따라서 ACB자리길을 따라 이동할 때 전기힘이 수행한 일은 다음과 같다.

$$A=A_1+A_2= qE \cdot \mathrm{AC} \qquad (2)$$

마지막으로 곡선자리길 ADB를 따라 이동할 때를 보자. 이 곡선자리길을 그림에서처럼 매우 작은 수많은 계단모양자리길들로 대치시킬수 있다. 계단이 무수히 많고 작을수록 이 자리길은 곡선모양에 가까와진다. 계단의 매 부분에서 전기마당방향에 수직인 자리길을 따라 q가 이동할 때에는 전기힘이 일을 수행하지 않는다. 오직 전기마당에 평행인 자리길을 따라 이동할 때에만 일이 수행된다. 그런데 매 계단에서 전기마당에 평행인 자리길들을 모두 합하면 그 길이가 AC와 같아진다. 따라서 q가 ADB자리길을 따라 이동할 때 전기힘이 한 일도 역시

$$A= qE \cdot \mathrm{AC} \qquad (3)$$

로 표시된다.

식 1, 2, 3에서와 같이 전기마당속에서 전하가 이동할 때 전기마당이 하는 일의 크기는 경로에 관계없이 처음자리와 마지막자리가 같으면 같다.

이처럼 전기마당속에서 어떤 두 점사이로 전하가 이동해갈 때 전기힘이 수행한 일은 자리길의 모양에는 관계되지 않고 첫 점과 마지막점에만 관계된다.

따라서 전기힘은 보존힘이다. 보존힘이 미치는 공간을 **보존힘마당**이라고 부른다.

전기마당이 수행하는 일의 이러한 특성은 전기마당이 고르롭지 않아도 정전기마당의 경우에는 그대로 나타난다.

정전기마당은 보존힘마당이다.

⚠ 중력마당도 보존힘마당이다.

전기마당속에서 전하의 자리에네르기

보존마당에서는 물체가 가지는 자리에네르기를 생각할수 있다.

그러면 전기마당속에서 전하는 얼마만한 자리에네르기를 가지겠는가.

점전하 q로부터 r만큼 떨어진 점 P에서 점전하 q_0이 가지는 자리에네르기(두 점전하들사이의 호상작용의 자리에네르기)를 구해보자.(그림 1-28)

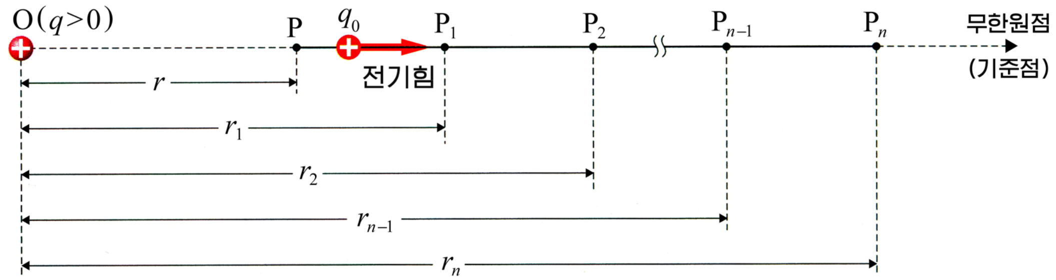


그림 1-28. 전하의 자리에네르기계산

이 자리에네르기는 이 점으로부터 자리에네르기의 기준점까지 q_0을 옮길 때 전기힘이 수행한 일의 크기와 같다.

그런데 전기힘의 크기는 자리에 따라 달라지므로 자리길을 작은 구간 PP_1, P_1P_2, …로 나눈 다음 매 구간에서 수행한 일을 구하고 이것들을 합하는 방법으로 전기힘이 한 일을 계산할수 있다.

점 P에서 P_1까지의 구간에서 q_0이 받는 전기힘은 꿀롱의 법칙으로부터 $k\dfrac{qq_0}{r^2} \sim k\dfrac{qq_0}{r_1^2}$ 범위에서 변한다. 구간이 아주 작을 때에는 이 구간에서 꿀롱힘의 평균값을 $k\dfrac{qq_0}{rr_1}$으로 볼수 있다.

그러므로 PP_1 구간에서 전기힘이 수행한 일은 다음과 같다.

$$\Delta A_1 = k\frac{qq_0}{rr_1}(r_1 - r) = kqq_0\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right)$$

따라서 q_0을 P점으로부터 P_n점까지 옮길 때 전기힘이 수행한 전체 일은

$$A = \sum_{i=1}^{n} \Delta A_i = kqq_0\left[\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right) + \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n}\right)\right] = kqq_0\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n}\right)$$

과 같다.

전기학에서는 전하의 자리에네르기의 기준점을 무한히 먼 점으로 잡고 여기서의 자리에네르기를 령으로 약속한다.

그러므로 $r_n \to \infty$로 보면 $1/r_n \to 0$으로 된다. 이때 웃식은

$$A = k\frac{qq_0}{r}$$

으로 표시된다.

이것이 바로 점전하 q가 만드는 전기마당속에서 q_0이 가지게 되는 자리에네르기이다. 즉

$$W = k\frac{qq_0}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{qq_0}{r}$$ **전기마당속에서 전하의 자리에네르기**

이처럼 점전하가 만드는 전기마당속에서 전하가 가지게 되는 자리에네르기는 거리에 거꿀비례한다.(그림 1-29) 그리고 두 전하의 부호에 따라 자리에네르기는 정의 값 또는 부의 값을 가질수 있다.

두 전하의 부호가 같을 때 전하의 자리에네르기는 정의 값이 되고 다를 때는 부의 값이 된다. 그러므로 점전하의 자리에네르기가 정의 값을 가진다는것은 이 전하에 밀힘이 작용하며 부의 값을 가진다는것은 끌힘이 작용한다는것을 의미한다.

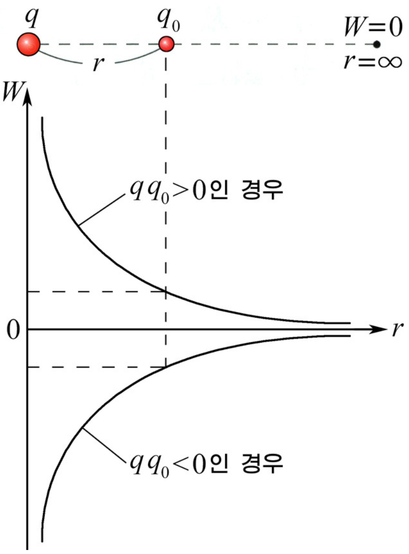


그림 1-29. 전하의 자리에네르기

생각하기 점전하의 자리에네르기 기준점을 왜 무한히 먼 점으로 잡았겠는가? 무엇이 편리한가?

문제

1. 양전하의 전기마당속에서 음전하가 가지는 자리에네르기 그리고 음전하의 전기마당속에서 양전하와 음전하가 가지는 자리에네르기는 령보다 크겠는가 작겠는가? 이것을 통하여 무엇을 알수 있는가?
2. 수소원자에서 전자의 자리에네르기와 전에네르기를 구하여라. 수소원자에서 전자의 자리길반경을 0.53×10^{-10}m로 본다.
3. 양전하 q_2의 전기마당속에서 양전하 q_1가 그림 1-30과 같은 닫긴자리길 ABCDA를 따라서(반경방향과 원둘레를 따라서) 이동한다. 자리길의 어느 부분에서 전기힘이 하는 일이 +, − 또는 0의 값을 가지겠는가? 그리고 전하 q_1이 처음자리로 되돌아왔을 때 전기힘이 하는 일의 크기는 얼마이겠는가?

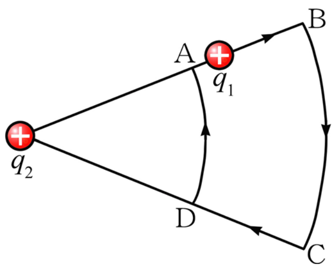


그림 1-30

제 7 절. 전 위

전 위

전기마당속에서 전하의 자리에네르기를 생각할수 있기때문에 이에 기초하여 전기마당을 특징짓는 또 하나의 량인 전위를 끌어들일수 있다.

시험전하 q_0이 가지게 되는 자리에네르기는 그의 전기량에 관계된다. 그러나 자리에네르기를 q_0으로 나눈 값 W/q_0은 q_0의 전기량에는 무관계하고 오직 전기마당의 주어진 점에만 관계되는 량으로서 전기마당을 특징지을수 있다.

전기마당의 주어진 점에서 단위양전하가 가지는 자리에네르기와 크기가 같은 량을 **전위**라고 부른다. 전위를 기호 φ로 나타내면 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\varphi = \frac{W}{q_0} \quad \text{전 위} \tag{1}$$

전위의 단위는 1V(볼트)이다. 1V는 전기마당속에서 1C의 양전하가 가지는 자리에네르기가 1J인 점의 전위이다.

이와 같이 전기마당은 벡토르량인 전기마당의 세기 $\vec{E}$와 함께 스칼라량인 전위 φ에 의해서도 특징지을수 있다.

생각하기 전기마당을 벡토르량인 전기마당의 세기보다 스칼라량인 전위로 고찰하는것이 더 편리하다. 왜 그런가?

? 점전하가 만드는 전기마당의 전위는 어떻게 표시되겠는가.

점전하 q의 전기마당속에서 시험전하 q_0이 가지게 되는 자리에네르기는

$$W = k\frac{qq_0}{r}$$

으로 표시된다.

따라서 점전하 q가 만드는 전기마당의 전위는 $\varphi = W/q_0$로부터

$$\varphi = k\frac{q}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q}{r} \quad \text{점전하의 전위} \tag{2}$$

로 표시된다.

이처럼 전위는 점전하로부터의 거리에 거꿀비례한다. 전위는 전기마당을 만드는 점전하의 부호에 따라 정의 값 또는 부의 값을 가진다.

<u>여러개의 점전하에 의하여 만들어진 전기마당의 어떤 점에서의 전위는 개별적점전하들이 그 점에 만드는 전위들의 대수적합과 같다.</u>(음전하가 만드는 전위는 덜어야 한다.)(그림 1-31)

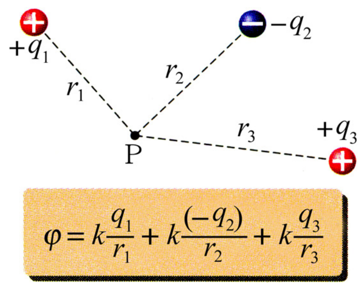


그림 1-31. 전위의 합성

전위차(전압)

전기마당속에 있는 양전하는 전기힘을 받아 자리에네르기가 큰 곳에서 작은 곳으로 이동한다.

이때 전기힘이 수행하는 일은 두 점의 자리에네르기차 $A=W_1-W_2$과 같다. 이 값을 이동하는 전하의 전기량 q로 나누면

$$\frac{A}{q}=\frac{W_1}{q}-\frac{W_2}{q}=\varphi_1-\varphi_2$$

으로 된다. 여기서 $\varphi_1-\varphi_2$을 전기마당속에 있는 두 점의 **전위차** 또는 **전압**이라고 부르고 기호 U로 표시한다.(그림 1-32) 즉

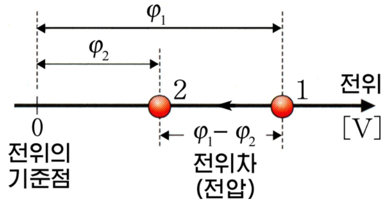


그림 1-32. 전위차(전압)

$$U=\varphi_1-\varphi_2=\frac{A}{q} \qquad \text{전 압} \qquad (3)$$

<u>전기마당속에서 두 점의 전위차(또는 두 점사이의 전압)는 이 두 점사이로 단위양전하를 옮길 때 전기힘이 수행하는 일과 크기가 같은 량이다.</u>

전위차의 단위도 전위와 마찬가지로 1V이다.

식 1에서 알수 있는것처럼 전기마당의 어떤 점에서 양전하가 가지는 자리에네르기가 클수록 그 점의 전위가 높다. 전하는 전기마당속에서 자리에네르기가 큰 곳에서 작은 곳으로 향하는 힘을 받으므로 양전하는 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 전기힘을 받아 이동한다.(그림 1-33) 음전하는 언제나 양전하와 반대방향의 전기힘을 받으므로 전위가 낮은 곳에서 높은 곳으로 전기힘을 받아 이동한다.

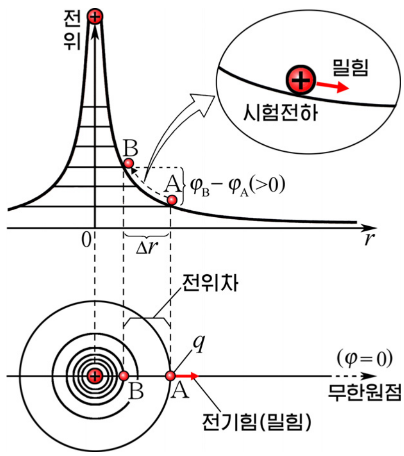


그림 1-33. 전위와 전하의 이동

전위의 기준점

전기마당속에서 전하가 가지는 자리에네르기의 기준점은 전기힘이 미치지 않는 무한히 먼곳으로 잡는다. 여기서는 전하들이 가지게 되는 자리에네르기를 령으로 약속한다.

전위는 전하의 자리에네르기를 그의 전기량으로 나눈 값으로서 전하의 자리에네르기에 의해 구해진다.

따라서 전위의 기준점도 무한히 먼 점으로 되며 이 점에서는 전위가 령이다.

자리에네르기의 크기는 기준점을 어디에 잡는가에 따라 달라지며 부의 값도 가질수 있다. 그러므로 전위도 기준점을 어디에 잡는가에 따라서 값이 달라질수 있으며 부의 값도 가질수 있다. 그러나 전위차(전압)는 전위의 기준점선택에 관계되지 않는다. 실지 전기마당속에서 어떤 점의 전위라고 할 때 그것은 바로 그 점과 기준점인 무한히 먼 점사이의 전위차를 말한다.

전기를 리용하는 기술공학에서는 전위의 기준점을 땅면으로 잡고 그의 전위를 령으로 약속한다.(그림 1-34) 그것은 지구의 전위가 전하들이 드나들어도 크게 달라지지 않기때문이다.

어떤 도체를 땅면과 련결하는것을 **접지**라고 부른다.

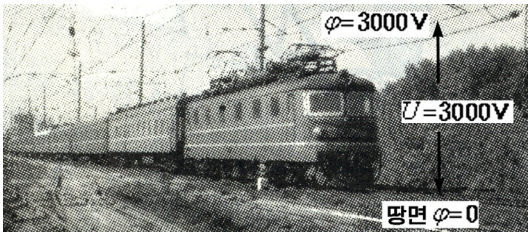


그림 1-34. 기준점의 실례

접지된 도체의 전위도 령으로 된다.

TV나 콤퓨터와 같은 전자회로들에서는 기구의 체를 전위의 기준점으로 잡는다.

전위의 기준점을 어디에 잡든 기준점의 전위는 령으로 약속한다.

※ 학교와 가정들에는 두개의 전기선이 들어온다. 여기서 《령선》이라고 부르는 하나의 전기선은 들어오기 전에 벌써 기준점인 땅과 련결되여 접지되여있다. 그리고 《상선》이라고 부르는 다른 한 전기선에는 기준점에 대하여 전압이 걸려있다. 전압이 220V라고 할 때 그것은 상선과 령선사이의 전압을 말하며 또한 상선과 땅면사이의 전압을 말한다.

문 제

1. 전기량이 2×10^{-9}C인 어떤 전하가 전기힘과 외부힘을 동시에 받으면서 전기마당속의 두 점 a, b를 지날 때 그의 운동에네르기가 8×10^{-5}J만큼 커졌다. 이때 외부힘이 6×10^{-5}J만 한 정의 일을 하였다면 점 a와 b사이의 전위차는 얼마이겠는가?

2. 그림 1-35와 같이 양전하 q가 만드는 전기마당속의 두 점 1, 2가 있다. 점 1과 2에서의 전기마당의 세기를 각각 E_1, E_2, 전위를 각각 φ_1, φ_2 이라고 할 때 다음의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

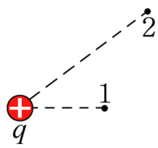


그림 1-35

ㄱ) $E_1>E_2$이며 $\varphi_1<\varphi_2$이다. ㄷ) $E_1<E_2$이며 $\varphi_1<\varphi_2$이다.
ㄴ) $E_1<E_2$이며 $\varphi_1>\varphi_2$이다. ㄹ) $E_1>E_2$이며 $\varphi_1>\varphi_2$이다.

3. 어떤 양전하가 무한히 먼곳에서 전기힘을 받아 전기마당의 어떤 점 M에 이르렀을 때 전기힘은 8×10^{-9} J의 일을 수행하였다. 그리고 전기량은 같고 부호가 반대인 음전하가 무한히 먼 점에서 전기힘을 극복하면서 등속으로 다른 점 N에 이르렀을 때 외부힘은 9×10^{-9} J의 일을 수행하였다. 점 M과 N의 전위를 φ_M, φ_N 이라고 할 때

다음의 표현식에서 정확한것을 선택하여라. 전위의 기준점은 무한히 먼곳에 잡는다.

ㄱ) $\varphi_M > \varphi_N > 0$

ㄴ) $0 > \varphi_M > \varphi_N$

ㄷ) $\varphi_N > \varphi_M > 0$

ㄹ) $0 > \varphi_N > \varphi_M$

제 8 절. 전기마당의 세기와 전위차사이의 관계

땅우에서 높이가 같은 곳들을 하나로 이으면 등고선이 된다.

지도에 등고선을 표시하면 땅의 생김새를 쉽게 알아볼수 있다.

전기마당도 전력선과 함께 등고선과 비슷한 선 또는 면으로 표시함으로써 전위의 크기분포를 한눈에 알아볼수 있게 할수 있다.

등전위면

전기마당속에서 전위가 같은 점들로 이루어진 면(또는 선)을 **등전위면**(또는 **등전위선**)이라고 부른다.

전기마당은 전력선과 함께 등전위면을 가지고도 그림으로 나타낼수 있다.

❓ 전력선과 등전위면이 어떤 관계에 있겠는가.

어떤 전하 q_0이 등전위면우에서 $\Delta\ell$만큼 이동할 때 전기힘이 하는 일을 구하면

$$\Delta A = F \cdot \Delta\ell \cdot \cos\alpha = q_0 E \cdot \Delta\ell \cdot \cos\alpha$$

로 된다. 여기서 α는 전력선과 등전위면사이의 각이다.

그런데 등전위면우에서 이동할 때는 전위가 변하지 않으므로 q_0의 자리에네르기도 변하지 않는다.

따라서 전기힘은 일을 수행하지 못한다. 즉

$$q_0 E \cdot \Delta\ell \cdot \cos\alpha = 0$$

이다. 여기서 $\cos\alpha$를 내놓고는 나머지량들은 령이 될수 없다.

따라서 $\cos\alpha = 0$이며 $\alpha = 90°$가 된다.

이처럼 <u>등전위면은 전력선에 수직이다.</u>

❓ 점전하가 만드는 전기마당의 등전위면은 어떤 모양을 띠겠는가.

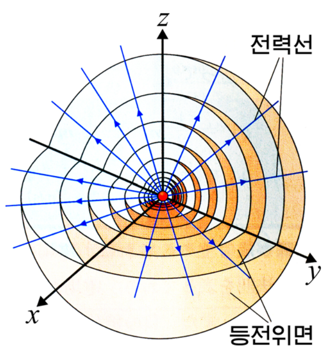


그림 1-36. 점전하의 등전위면

점전하 q가 만드는 전위는 $\varphi = k\dfrac{q}{r}$로 표시되므로 r가 같은 점들은 모두 전위가 같다.

그러므로 q에 중심을 둔 동심구면들은 다 등전위면이 된다.(그림 1-36)

그림 1-37에서 각이한 전하들이 만드는 전기마당에서 전력선들과 등전위면들을 보여준다.

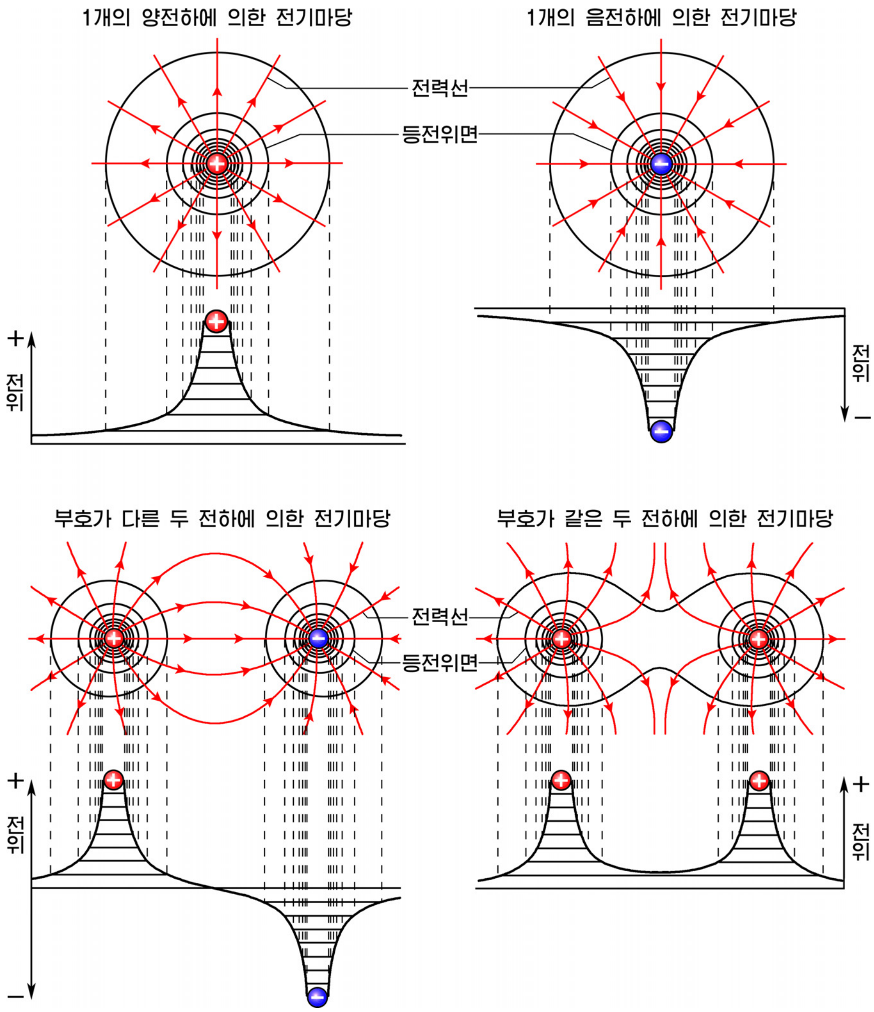


그림 1-37. 각이한 전하들이 만드는 등전위면

보다싶이 전기마당의 그 어느 점에서나 전력선과 등전위면은 서로 수직이다.

등전위면을 그릴 때에는 이웃한 등전위면들사이의 전위차가 일정하게 한다.(그림 1-38)

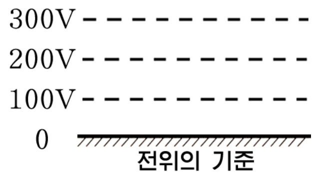


그림 1-38. 등전위면의 전위차

해보기

무한평면전하주위에서 등전위면을 그려보아라.

등전위면(선)도 전력선과 마찬가지로 실제 존재하는 면(선)이 아니라 전기마당을 직관적으로 표시하기 위해 끌어들인것이다.

전기마당의 세기와 전위차사이의 관계

전기마당의 세기와 전위는 모두 전기마당을 특징짓는 량들이다. 그러면 이 두 량사이에는 일정한 관계가 있지 않겠는가.

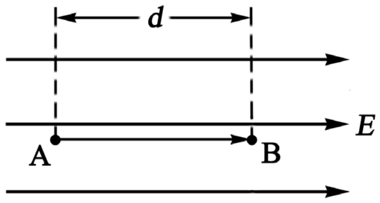


그림 1-39. 고른전기마당속에서 전하의 이동

그림 1-39와 같이 고른전기마당 E속에서 전하 q가 전기힘만을 받아 A점에서 B점까지 전력선을 따라 거리 d만큼 옮겨갔다고 하자.

이때 전기힘이 수행한 일을 전기힘과 전하의 자리에네르기를 가지고 따로따로 구해보자.

전하는 qE의 전기힘을 받아 전력선방향으로 d만큼 이동하였다. 그러므로 수행된 일은

$$A_1 = qEd$$

로 된다.

한편 전기마당이 전하에 수행한 일은 그것이 가지는 자리에네르기의 차와 같아야 한다. 즉

$$A_2 = W_A - W_B = q\varphi_A - q\varphi_B = q(\varphi_A - \varphi_B) = qU_{AB}$$

A_1와 A_2은 전기힘이 수행한 일을 서로 다른 측면에서 계산한 량이므로 식은 다르게 표시되였지만 그 크기는 같아야 한다. 그러므로

$$qEd = qU_{AB}$$

즉

$$U_{AB} = Ed$$

이처럼 전기마당의 방향에서 어떤 두 점사이의 전위차는 전기마당의 세기에 두 점사이의 거리를 곱한것과 같다.

이 식으로부터 두 점사이에 전위차가 있으면 그사이에 전기마당이 존재한다는것을 알수 있다.

웃식을 일반적으로 표시하면 다음과 같다.

$$E = \frac{U}{d}$$ **전기마당의 세기와 전위차사이의 관계**

고른전기마당에서 전기마당의 세기의 크기는 마당방향에서 단위길이당 전위차(또는 전압)와 같고 방향은 등전위면에 수직이면서 전위가 낮아지는쪽으로 향한다. 여기서 U/d를 **전위의 구배**라고 부른다.

이 식에 의하면 전기마당의 세기단위를 1V/m로서도 표시할수 있다는것을 알수 있다.

고르롭지 않은 전기마당의 경우에는 웃식이 d가 매우 작은 구간(전기마당이 고르롭다고 볼수 있는 구간)에서만 성립한다.

식 $E=\dfrac{U}{d}$ 에 의해 전기마당속에서 전위가 급격히 변하는 곳에서는 전기마당의 세기가 크고 완만히 변하는 곳에서는 전기마당의 세기가 작다는것을 알수 있다.

그러므로 <u>등전위면이 배게 분포된 곳에서는 전기마당의 세기가 크고 성글게 분포된 곳에서는 전기마당의 세기가 작다.</u>

양전하는 전기힘을 받아 전력선이 뻗은 방향쪽으로 이동한다. 이때 전하의 자리에네르기가 작아진다. 즉 전기마당의 전위가 낮아진다.

따라서 등전위면들가운데서 전력선방향으로 가면서 놓인 면들일수록 전위가 낮은 면들이다.

[례제] 그림 1-40에는 부호가 다른 두 점전하가 만드는 전기마당의 등전위면을 5V간격으로 표시하였다. 외부힘의 작용에 의해 전기량이 2C인 전하가 A→B→C→D→E→F→G의 경로를 따라 등속으로 이동한다. 이때 전기힘이 수행한 일에 대하여

ㄱ) 어느 구간에서 제일 큰 일을 수행하겠는가?

ㄴ) 어느 구간에서 수행한 일이 령이겠는가?

ㄷ) 어느 구간에서 부의 일을 수행하였으며 그 크기는 얼마인가?

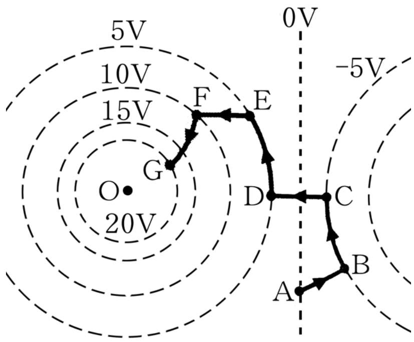


그림 1-40

풀이. ㄱ) 전위차가 제일 큰 구간에서 전기힘은 제일 큰 일을 수행한다. 따라서 CD와 FG구간이다.

ㄴ) 등전위면을 따라 이동할 때 전기힘은 일을 수행하지 않는다. 따라서 BC와 DE구간이다.

ㄷ) 전기힘은 CD와 EF, FG구간에서 부의 일을 수행한다.
CD구간에서 전기힘이 수행한 일은 $A=q\left(\varphi_C-\varphi_D\right)=2\times(-5-5)=-20(\text{J})$이고 EF구간에서 수행한 일은 -10J이며 FG구간에서 수행한 일은 -20J이다.

문 제

1. 그림 1-41에는 한개 점전하가 만드는 전기마당의 전력선과 등전위면을 표시하였다. 어떤 속도로 A점에 입사한 전하가 전기힘을 받아 곡선자리길을 그리면서 B점에 이르렀다. 전하의 부호를 결정하여라.

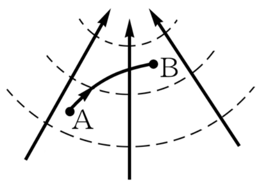


그림 1-41

2. 흔히 소립자들의 에네르기를 평가할 때 eV(전자볼트)라는 에네르기의 단위를 쓴다. 1eV는 전위차가 1V인 전기마당의 두 점사이에서 전자가 얻게 되는(또는 잃게 되는) 운동에네르기의 크기이다. 전자의 전기량이 e=1.6×10^{-19}C인 때 1eV=1.6×10^{-19}J 임을 증명하여라.

3. 고른전기마당속에 세 점 a, b, c가 있다. 여기서 ac⊥bc, ab=5cm, ac=3cm, bc=4cm이다.(그림 1-42) 점 a와 b사이의 전위차는 U_{ab}=12V이며 $\varphi_a > \varphi_b$이다. 전기마당의 세기가 E=400V/m 라면 전기마당의 방향은 어디로 향하겠는가? 아래의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

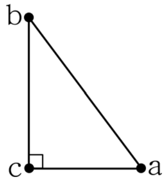


그림 1-42

ㄱ) a에서 c로 향한다.　　　ㄷ) c에서 a로 향한다.

ㄴ) b에서 c로 향한다.　　　ㄹ) a에서 b로 향한다.

제 9 절. 전기마당속의 도체

정전기유도

도체속에는 자유롭게 이동할수 있는 많은 전기나르개들이 있다. 실레로 금속에서는 자유전자들이, 전해질에서는 이온들이 자유롭게 이동할수 있다.

? 그러면 전기마당속에 놓인 도체에서는 어떤 현상이 일어나겠는가.

그림 1-43과 같이 전기마당 E_0속에 금속도체를 놓았다고 하자.

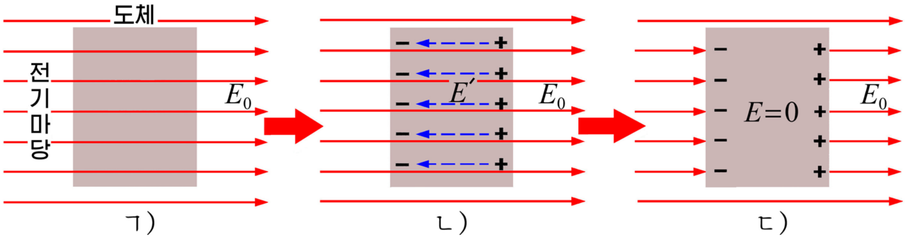


그림 1-43. 정전기유도

이때 전기마당은 도체속의 자유전자들에 전기힘을 준다. 따라서 전자들은 전기마당과 반대방향으로 이동하면서 도체의 왼쪽 면에 쌓이게 된다.

그리고 도체의 오른쪽 면에는 전자가 모자라게 되므로 양전하가 쌓이는셈으로 된다. 이때 도체의 량걸면에 나타나는 전하들을 **유도전하**라고 부른다.

유도전하들은 외부전기마당과 반대방향의 보충적인 전기마당 E'를 만드는데 E'는 유도전하가 많을수록 크게 된다. 전자들의 이동이 계속되면 E'가 계속 커지며 어느때 가서는 외부전기마당의 세기 E_0과 같게 된다.

이때 도체속에서는 전기마당의 세기가 령으로 되여 전자들의 이동은 더는 진행되지 않는다. 이와 같은 과정은 매우 짧은 순간사이에 일어난다.

이처럼 외부전기마당속에 놓인 도체의 량걸면에 부호가 반대인 전하들이 나타나는 현상을 **정전기유도**라고 부른다.

<u>정전기유도현상에 의하여 전기마당속에 놓인 도체안에서 전기마당의 세기는 령이 된다.</u>

그림 1-44에서와 같이 도체안에서 어떤 구면을 생각할 때 이것을 지나는 전력선묶음은 가우스정리에 의해 $\sum E\cdot\Delta S=\frac{\sum q}{\varepsilon_0}$ 로 된다. 그런데 도체안에는 전하들이 없으므로(즉 $\sum q=0$ 이므로) $\sum E\cdot\Delta S=0$ 즉 $E=0$이여야 한다. 그러므로 <u>대전된 도체안에서는 전기마당의 세기가 령이다.</u>

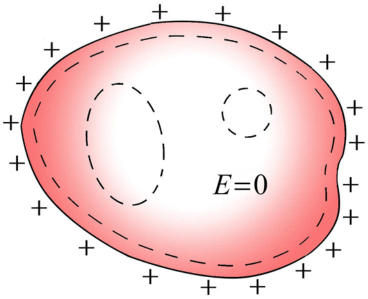


그림 1-44. 도체안에서 가우스정리의 리용



대전체를 검전기의 꼭지부위에 가까이 가져가면 검전기의 바늘이 벌어진다. 왜 그런가?

정전기유도현상에 의하여 속이 텅 빈 도체속에서나 그물모양으로 뒤덮인 도체속에서도 역시 전기마당이 령으로 된다. 이것은 외부전기마당이 도체속으로 뚫고들어가지 못한다는것을 보여준다.

이처럼 도체함 또는 도체그물이 주위전기마당을 막는 현상을 **전기차페**라고 부른다.

전기차페현상은 실천에서 널리 쓰인다. 고압선이 지나간 도로우에 쇠그물을 설치한것이나 마이크선을 차페선으로 한것 그리고 통신용케블의 걸면에 연피복을 씌우는것은 모두 전기차페를 리용하여 외부전기마당의 영향을 막기 위해서이다.



검전기를 금속그물함으로 씌웠을 때와 씌우지 않았을 때 대전체를 꼭지부위에 가져다보면서 정전기유도와 전기차페현상을 관찰해보아라.

대전된 도체에서 전하의 분포와 전기마당

도체에 전하를 주면 이것들은 어떻게 분포되겠는가.

대전된 도체안에서 전하들은 부호가 갈기때문에 서로 밀게 된다. 그러므로 도체에 준 전하들은 서로 밀리여 도체의 걸면근방으로 몰리게 된다.

따라서 <u>전하들은 도체의 걸면에만 분포된다.</u>

그러면 도체에 준 전하들은 도체걸면의 어느 부분에 많이 쌓이겠는가.

포탄모양의 도체에 전하를 주면 뾰족한 부위(첨단)에 달린 석종이띠가 제일 많이 벌어진다.(그림 1-45)

이것은 도체의 다른 곳보다 첨단에 더 많은 전하가 쌓인다는것을 보여준다.

대전된 도체의 첨단부분에 많은 전하들이 쌓이므로 그 주위의 전기마당도 다른 곳보다 세다.

이때 첨단부분에서의 전기마당의 세기는 그 부분에서의 겉면전하밀도에 비례한다. 즉

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

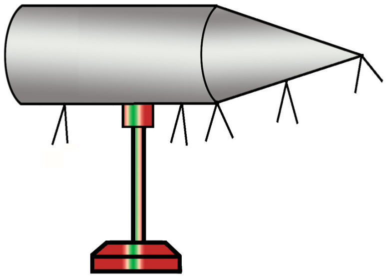


그림 1-45. 도체에서 전하의 분포

자료

정전고압장치

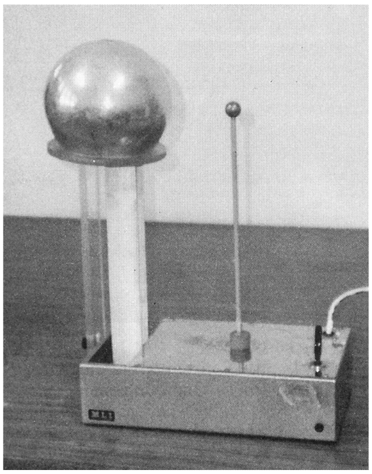
도체에서 전하가 겉면에만 분포되며 도체안에서 전기마당의 세기가 령이 되는 현상은 높은 전압을 얻는데 리용되고있다.

이런 장치를 **정전고압장치**라고 부른다.(그림 1-46)

전원의 전극에는 높은 전압이 걸린다. 그러므로 전극주위에서 일어나는 첨단방전에 의해 전하들이 가속되여 피대에 박힌다. 이 전하들은 피대에 실려 금속구안으로 운반되며 솔에서의 첨단방전에 의해 금속구의 안쪽 면에 전달된다. 안쪽 면에 전달된 전하들은 모두 금속구의 바깥면에만 분포된다.

금속구가 둘러싼 안쪽에는 전기마당이 없으므로 전하들을 계속 넘겨줄수 있으며 금속구의 전기량과 전위를 계속 높일수 있다. 금속구의 전위가 충분히 높아지면 전하들이 공기속으로 빠져나가는 과정이 진행되는데 이때까지 전위를 높일수 있다.

정전고압장치는 대전립자를 빠른 속도로 가속하는 장치로 리용되고있다.



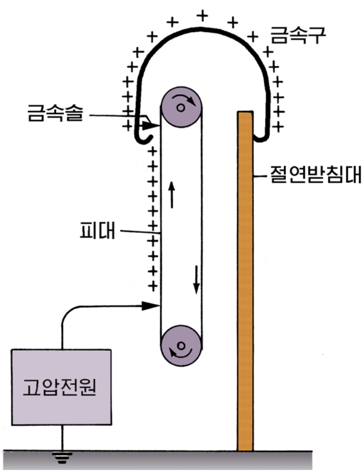


그림 1-46. 정전고압장치

첨단주위의 센 전기마당은 공기속의 전자들을 가속시켜 공기속에 이온들이 생겨나게 할수 있다. 이온들이 많이 생겨나면 공기속에 전류가 생겨 도체속의 전하들이 공기속으로 흘러나가게 된다. 이런 현상을 **첨단방전**이라고 부른다.

첨단방전은 피뢰침에 리용된다.(그림 1-47)

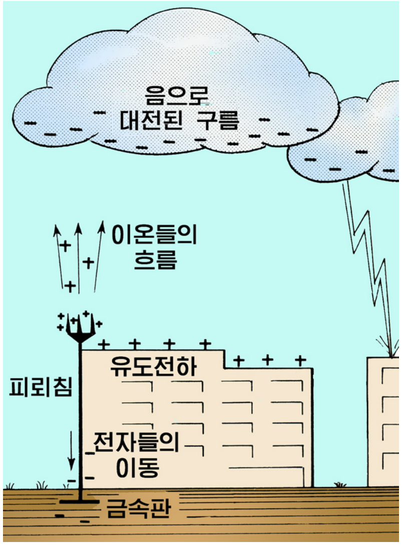


그림 1-47. 피 뢰 침

도체에서 전위의 분포를 따져보자.

전기마당속에 놓인 도체나 대전된 도체나 할것없이 도체안에서 전기마당의 세기는 령이다.

그러므로 도체안에서 간격이 d인 임의의 두 점사이의 전위차(전압)는 $U=Ed=0$이 된다. 이것은 이 두 점의 전위가 같다는것을 의미한다.

도체안의 모든 두 점들에 대해서도 마찬가지이다.

따라서 도체의 모든 곳의 전위는 다 같고 도체는 등전위체라고 볼수 있다.

그러므로 도체에서 전하의 분포가 각이하여도 도체겉면은 등전위면으로 된다.

도체겉면이 등전위면이므로 도체겉면에서 전기마당의 방향은 어느곳에서나 겉면에 수직이다.(그림 1-48)

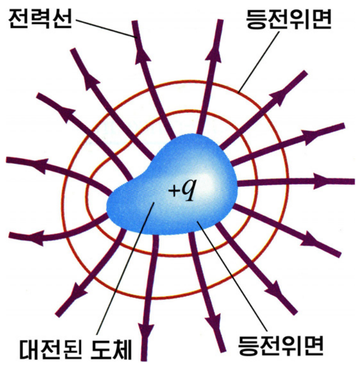


그림 1-48. 도체의 겉면은 등전위면

문 제

1. 서로 다른 부호로 대전된 두 구 A와 B사이에 그림 1-49처럼 대전되지 않은 두 금속막대기 C와 D를 놓았다. 이제 도선으로 금속막대기 C의 x점과 D의 y점을 련결하였다. 그러면 전자들은 어떻게 되겠는가? 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

   ㄱ) 도선을 따라 x점에서 y점으로 흘러간다.

   ㄴ) 도선을 따라 y점에서 x점으로 흘러간다.

   ㄷ) 도선을 따라 흘러가지 않는다.

   ㄹ) 판단할수 없다.

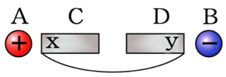


그림 1-49

2. 그림 1-50에서 금속구 P는 양전하로 대전되고 도체 Q는 대전되지 않았다. 구 P를 도체 Q가까이에 가져다놓으면 정전기유도에 의해 도체 Q의 A쪽은 전기량 q_A를 띠고 전위가 φ_A로 되며 B쪽도 q_B, φ_B로 된다. 다음의 판단에서 정확한것들을 선택하여라.

ㄱ) 도체 Q의 A쪽을 손으로 만졌다가 구 P를 치우면 도체 Q는 양전하를 띤다.

ㄴ) 도체 Q의 가운데를 손으로 만졌다가 구 P를 치우면 도체 Q는 음전하를 띤다.

ㄷ) $q_A > q_B$ 이며 $\varphi_A < \varphi_B$ 이다.

ㄹ) $q_A = q_B$ 이며 $\varphi_A = \varphi_B$ 이다.

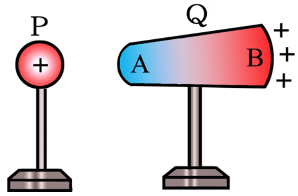


그림 1-50

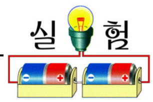
3. 가우스정리를 리용하여 대전된 도체근방에서 전기마당의 세기가 $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$ 로 표시된다는것을 증명하여라.

제 10 절. 전기마당속의 유전체

유전체의 분극

도체와 달리 부도체에는 자유롭게 이동할수 있는 전하들이 없다. 부도체에서는 모든 전자들이 원자나 분자내에 세게 속박되여있다.

그러면 부도체에 전기마당을 걸어주면 어떤 현상이 일어나겠는가.



○ 실에 매단 석종이(도체)가까이에 털에 마찰한 염화비닐막대기를 가까이 가져간다.(그림 1-51) 이때 석종이는 대전체에 끌리여간다. 그것은 정전기유도에 의해 석종이의 량쪽에 부호가 반대인 전하들이 생겼기때문이다.

○ 다음 실에 매단 탁구공(부도체)가까이에 역시 대전된 염화비닐막대기를 가져간다. 이때 부도체인 탁구공도 대전체에 끌린다.

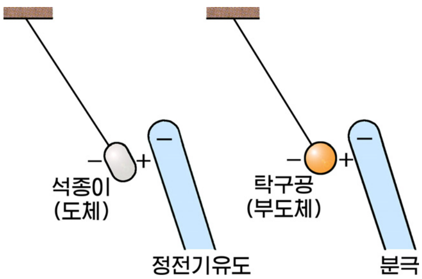


그림 1-51. 정전기유도와 유전체의 분극

실험에서 알수 있는것처럼 부도체인 탁구공도 전기마당에 의해 그의 량쪽에 서로 반대부호의 전하가 나타났다고 보아야 한다.

이와 같은 전기적현상이 나타난다는 의미에서 부도체를 **유전체**라고도 부른다.

전기마당속에서 유전체의 량걸면에 서로 다른 부호의 전하가 나타나는 현상을 **유전체의 분극**이라고 부른다.

그러면 유전체의 분극은 어떻게 일어나겠는가.

유전체를 이루고있는 분자(또는 원자)에서 양전하(핵)의 중심과 음전하(전자)의 중심이 일치하는 분자를 **무극분자(무극성분자)**라고 부르며 일치하지 않는 분자를 **유극분자(극성분자)**라고 부른다.

He, H_2, O_2, CO_2 등은 무극분자이며 HCl, H_2O, CO 등은 유극분자이다.

이와 같은 분자들로 이루어진 유전체에서는 전기마당이 없을 때 겉면에 아무런 전하도 나타나지 않는다.

무극분자유전체가 전기마당속에 놓이면 분자 또는 원자에서 질량이 작은 전자로 이루어진 음전하의 중심이 전기마당과 반대방향으로 약간 치우친다. 따라서 양전하의 중심과 음전하의 중심이 벌어진다.(그림 1-52) 이에 따라서 유전체의 량겉면에는 서로 반대부호의 전하들이 나타난다. 유전체내부에서는 서로 이웃한 분자(또는 원자)의 양전하와 음전하의 전기량이 상쇄되여버린다.

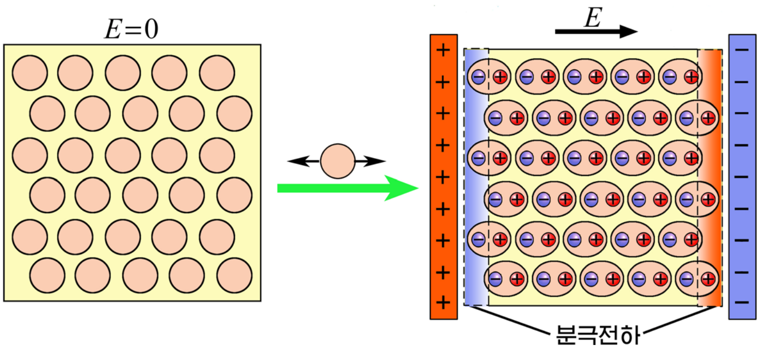


그림 1-52. 무극분자유전체의 분극

유극분자유전체에서는 비록 분자(또는 원자)의 양전하와 음전하의 중심이 일치하지 않아도 전기마당이 없으면 무질서한 열운동으로 하여 유전체의 어느 부분에도 전하들이 나타나지 않는다. 그러나 전기마당속에서는 유극분자들의 축이 전기마당방향으로 정돈되므로 유전체의 량겉면에 반대부호의 전하들이 나타나게 된다.(그림 1-53)

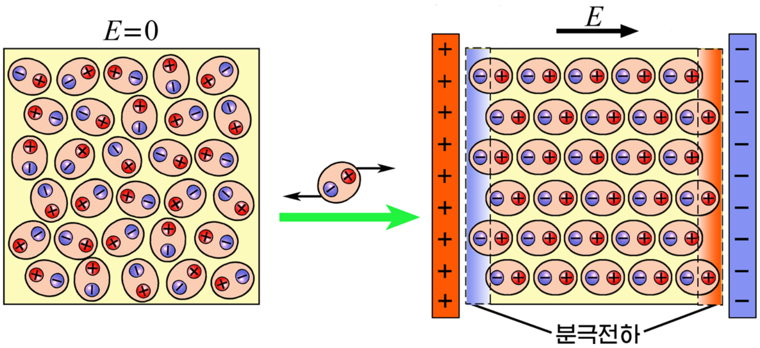


그림 1-53. 유극분자유전체의 분극

유전체의 분극과정에 량겉면에 나타나는 전하를 **분극전하**라고 부른다.

유전체는 왜 대전체에 끌리는가.

유전체에서는 분극에 의해 대전체에 가까운쪽에는 대전체와 반대부호의 분극전하가 나타나고 먼쪽에는 같은 부호의 전하가 나타난다. 그런데 대전체가까이에서는 그것이 만드는 전기마당의 세기가 먼곳에서보다 크다. 그러므로 유전체에 작용하는 끌힘이 밀힘보다 크다. 이런 리유로 하여 부도체인 탁구공이나 종이쪼각 같은것들이 대전체에 끌리게 된다.

정전기유도에 의해 석종이와 같은 대전되지 않는 도체들이 대전체에 끌리는것도 이와 같이 설명된다.

고른전기마당속에서는 정전기유도나 유전체의 분극이 일어나도 물체들은 그 어떤 전기힘을 받지 않는다.

유전체속에서 전기마당

정전기유도에 의해 도체속의 전기마당의 세기는 령이 된다.

그러면 유전체의 분극에 의해서는 유전체속의 전기마당이 어떻게 되겠는가.

그림 1-54와 같이 고른전기마당 E_0속에 유전체판대기를 마당방향에 수직으로 놓았다고 하자.

이때 유전체의 량걸면에 나타난 분극전하들은 외부전기마당과 반대방향으로 향하는 보충전기마당 E'를 만든다. 따라서 유전체속에서 전기마당의 세기는 $E = E_0 - E'$로서 외부마당의 세기보다 작아진다. 그러나 정전기유도에서처럼 령으로는 되지 않는다.

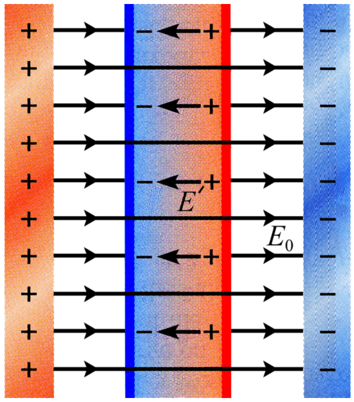


그림 1-54. 유전체속에서 전기마당

외부전기마당의 세기 E_0과 유전체속에서 전기마당의 세기 E사이의 비

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \quad \text{유 전 률}$$

을 유전체의 **유전률** (또는 **상대유전률**)이라고 부른다.

※ 전기상수 ε_0은 진공의 절대유전률이다.

유전률은 유전체속에서의 전기마당의 세기가 외부마당에 비하여 얼마나 약해지는가를 보여주는 물리적량이다.

유전체내부에서는 전기마당의 세기가 $E = E_0/\varepsilon$으로 작아진다.

아래의 표에 몇가지 물질들의 유전률을 제시하였다.

유전률표

물 질	ε	물 질	ε
진 공	1	운 모	6~7
공기(0℃, 표준대기압)	1.000 54	물	78
류 황	4	로 쎌 염	7 000
유 리	5~7	티탄산바리움	10^4



물과 같은 유전체속에 있는 두 점전하에 대하여 꿀롱의 법칙이 어떻게 표시되겠는가?

문 제

1. 정전기유도와 유전체분극의 공통점과 차이점을 지적하여라.
2. 유전률이 4인 평판모양유전체가 고른전기마당속에서 마당방향에 수직으로 놓여있다. 유전체평판에 와닿은 외부전기마당의 전력선수가 100개라면 그중 몇개의 전력선이 분극전하에 의해 끊기겠는가?
3. 고른전기마당속에서 유극분자가 어떤 운동을 하겠는가를 따져보아라. 유극분자에서 양전하의 중심과 음전하의 중심사이의 거리는 변하지 않는다.

제 11 절. 압전체와 강유전체

압전체와 강유전체는 과학과 기술분야에서 널리 쓰이는 전자재료의 하나이다.

압 전 체

유전체의 분극은 외부전기마당의 작용에 의하여 일어난다. 그러나 석영이나 티탄산바리움과 같은 결정구조를 이루는 일부 유전체들에서는 외부힘이 작용할 때에도 분극이 일어난다.

실례로 티탄산바리움($BaTiO_3$)결정의 우와 아래면에 붙인 전극에 네온등을 이어놓고 이 결정을 고무망치로 때리면 네온등에 순간적으로 불이 켜진다.(그림 1-55) 이것은 력학적힘에 의해 결정이 변형되면서 그 걸면에 서로 반대부호의 전하가 나타나 네온등으로 전류가 흐른 결과이다.

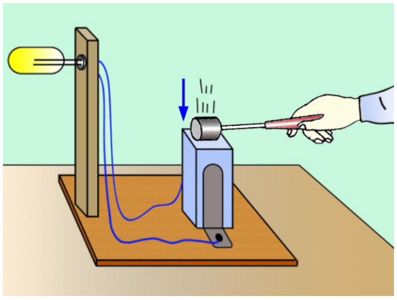


그림 1-55. 압전효과

결정에 력학적변형을 줄 때 그 걸면에 서로 반대부호의 전하가 나타나는 현상을 **압전효과(피에조효과)**라고 부르며 이와 같은 성질을 가지는 유전체를 **압전체**라고 부른다.

압전효과가 생기는 원인을 석영을 가지고 설명해보자. 석영(SiO_2)결정에서 한개의 단위(단위살창)를 보면 양전하를 띤 세개의 규소원자와 음전하를 띤 세개의 산소원자가 그림 1-56의 ㄱ에서처럼 바른6각형을 이루고있다.

석영결정에 힘이 가해지지 않았을 때는 양전하들의 중심과 음전하들의 중심이 일치한다. 그러나 석영결정에 우와 아래에서 힘을 주면 규소원자 1과 산소원자 4가 안으로 밀리여들어간다.(그림 1-56의 ㄴ) 그러므로 양전하의 중심과 음전하의 중심이 벌어진다. 모든 단위살창들에서 이와 같은 현상이 생기면 결국 석영결정이 분극되여 결정의 웃면에는 －의 분극전하들이, 아래면에는 ＋의 분극전하들이 나타나게 된다.

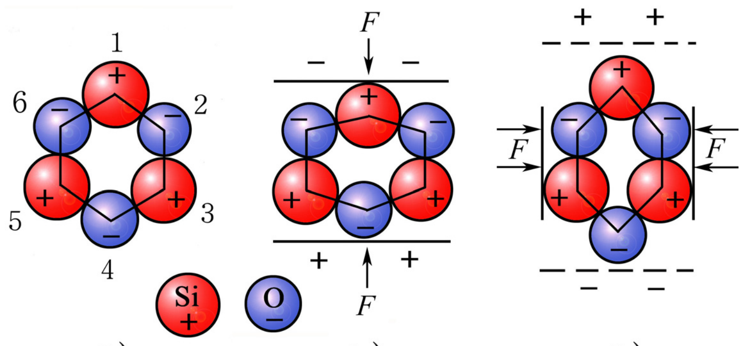


그림 1-56. 석영에서 압전효과

압전체를 량옆에서 누르면(이것은 압전체를 아래우로 늘군것이나 같다.) 규소원자 1과 산소원자 4가 밖으로 빠져나가므로 앞에서와는 반대로 분극된다.(그림 1-56의 ㄷ)

석영결정에 10^5Pa의 압력을 주면 그의 량걸면에는 대략 0.5V의 전위차가 형성되게 분극전하들이 생긴다.

압전체는 력학적인 힘을 주어 전기를 얻는데 리용된다. 그러므로 압전체는 압전마이크, 힘측정수감기, 압전점화기 등과 전자회로의 요소들에 널리 리용되고있다.

압전체에 반대로 전기마당을 걸어주면 그것이 변형된다. 이런 현상을 **역압전효과(역피에조효과)**라고 부른다. 역압전효과가 일어나는 원인을 석영결정에서 보면 외부전기마당의 작용에 의하여 규소원자 1과 산소원자 4가 서로 반대방향으로 변위되면서 압전체전체로서 변형되기때문이다.

역압전효과는 전기적신호를 력학적인 변형으로 바꾸는데 리용된다. 압전고성기, 초음파발생기 등이 역압전효과의 대표적인 응용실례들이다.

강유전체

유전체를 분극시키기 위해서는 유전체에 전기마당이나 력학적힘을 가해주어야 한다. 그런데 전기마당이나 힘을 가하지 않아도 본래부터 스스로 분극되여있는 많은 구역들을 가지고있는 유전체들도 있다. 이런 유전체들의 유전률은 매우 크다. 일반적으로 유전률이 큰 유전체를 **강유전체**라고 부른다. 로쎌염, 티탄산바리움 등은 강유전체이다.

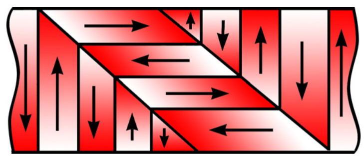


그림 1-57. 자발분극구역

강유전체가 스스로 분극되는 현상을 **자발분극**이라고 부르고 자발분극되여있는 구역을 **자발분극구역**이라고 부른다.

외부전기마당이 없을 때 강유전체에서는 서로 이웃한 자발분극구역들의 분극방향이 90° 또는 180° 의 각을 이루고있다.(그림 1-57)

따라서 전체적으로 볼 때 분극은 서로 상쇄되고 강유전체는 분극을 나타내지 않는다.

그러나 강유전체에 전기마당을 가하면서 증가시키면 전기마당과 비슷한 방향으로 분극되여있는 구역들이 확장되기도 하고 마당방향으로 정돈되기도 하면서 강유전체는 전체적으로 전기마당방향으로 분극된다. 이 상태에서는 전기마당을 아무리 크게 하여도 분극이 더는 커지지 않고 포화된다.(포화분극)

외부전기마당의 세기를 변화시킬 때 일어나는 강유전체의 분극정도를 그라프로 나타내면 그림 1-58과 같다. 외부전기마당을 점점 크게 하면 강유전체의 분극은 곡선 ㄱ을 따라 일어난다.

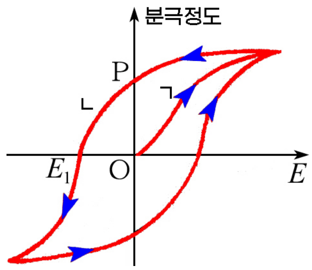


그림 1-58. 리력곡선

분극이 더 커지지 않는 상태에서 전기마당을 작게 하면 분극은 곡선 ㄴ을 따라 일어난다.

보다싶이 강유전체에 가해졌던 전기마당을 없애도 분극은 령으로 되지 않고 그림에서처럼 OP만한 분극이 남아있게 된다. 이것을 **잔류분극**이라고 부른다. 잔류분극을 없애기 위해서는 원래와 반대방향으로 E_1만 한 전기마당을 걸어주어야 한다.

강유전체의 분극곡선을 보면 그의 분극정도가 그때의 외부전기마당의 세기뿐아니라 이미 얼마만한 전기마당속에 놓여있었는가 하는 《리력》에도 관계된다는것을 알수 있다. 이와 같은 현상을 **전기리력현상**이라고 부르며 강유전체의 분극정도를 보여주는 그라프를 **전기리력곡선**이라고 부른다.

강유전체는 자발분극구역을 가지고있기때문에 다음의 몇가지 성질을 나타낸다.

첫째로, 강유전체의 온도가 어떤 한계를 넘어서면 보통 유전체로 된다. 이 온도를 **큐리온도**(또는 **큐리점**)라고 부른다. 큐리온도가 존재하는것은 이 온도이상에서는 원자들의 무질서한 열운동으로 하여 자발분극구역들이 파괴되기때문이다. 실례로 티탄산바리움은 120℃아래의 온도에서만 강유전체로 되고 그 이상의 온도에서는 보통유전체로 된다.

둘째로, 강유전체의 유전률은 일정하지 않고 외부전기마당의 세기에 따라 변하며 외부전기마당의 세기와 분극정도사이의 관계에서는 리력현상이 나타난다.

셋째로, 강유전체는 압전효과를 나타낸다.

강유전체는 전기절연재료와 축전기의 재료로서 널리 리용된다.

※ 강유전체는 모두 압전체이다. 그러나 압전체라고 하여 모두 강유전체는 아니다. 실례로 압전체인 수정(석영)은 강유전체가 아니다.

문 제

1. 보통유전체에서는 분극정도가 외부전기마당세기에 비례한다. 이 비례결수는 유전체의 유전률을 결정한다. 이에 근거하여 강유전체의 유전률이 외부전기마당의 세기에 따라 변한다는것을 리력곡선을 가지고 설명하여라.
2. 압전마이크와 압전고성기의 원리를 설명하여보아라.
3. 그림 1-59는 량결면에 전극을 입히고 인출선을 뽑아낸 압전체를 보여준다. 여기서 A는 압전체이고 B와 C는 그에 입힌 전극이다. 압전체가 변형되여 그의 웃쪽에 +분극전하가, 아래쪽에 −분극전하가 나타났다고 할 때 전극 B와 C의 끌단자에 생기는 전기량의 부호를 결정하여라.

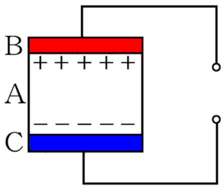


그림 1-59

자료 — 압전점화기

생활과정에 우리는 가스라이타나 가스곤로에서 손으로 힘을 주어 불을 켜는것을 흔히 볼수 있다. 이것은 바로 압전체에 힘을 주어 전기를 일으키고 이것으로 불을 지피는것이다. 이런 장치를 **압전점화기**라고 부른다.

압전점화기의 구조를 그림 1-60에 제시하였다.

압전효과를 높이기 위해 두개의 꼭같은 압전체들을 서로 마주 붙여놓고 접촉부에서 한개 전극을 뽑고 량끌들에서 한개 전극을 뽑았다.

누르개로 압전체를 누르면 압전체들이 분극된다.

그러면 압전체에서 뽑은 전극들에도 정전기유도에 의해 반대부호의 전하들이 유도된다. 그런데 전극들의 끌을 첨단으로 만들었으므로 전극들사이에는 대단히 높은 전압이 걸린다. 그러면 첨단방전에 의해 공기분자들이 이온화되는데 이것이 바로 불씨가 된다.

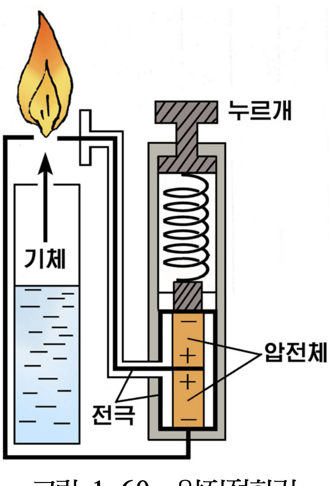


그림 1-60. 압전점화기

누르개를 누를 때 가스변이 동시에 열리게 되여있으므로 분출되는 가스에는 불씨에 의해 불이 달린다.

제 12 절. 축전기와 전기용량

축전기와 그의 전기용량

TV나 콤퓨터 등의 전자기구들의 전자회로판에는 많은 축전기들이 붙어있다.

그러면 축전기는 전기적으로 어떤 특성을 가지고있겠는가.

그림 1-61과 같이 두개의 금속판 A와 B를 평행으로 가까이 배치하여놓고 여기에 전지를 련결하자.

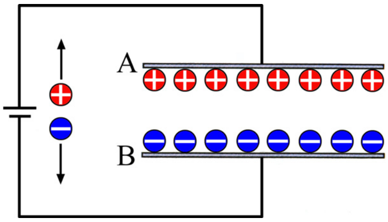


그림 1-61. 두 금속판의 충전

그러면 전지는 A판에 있는 전자를 끌어다 B판에 쌓아놓는다. 결과 A판은 양전하로 대전되고 B판은 음전하로 대전된다. 이때 두 극판에 쌓인 전하들의 전기량은 같으며 전기적인 끌힘에 의해 전하들은 금속판들의 서로 마주하고있는 안쪽 면들에 쌓인다. 이와 같은 과정은 두 금속판사이의 전위차(전압)가 전지의 전동력과 같아질때까지 진행된다.

서로 절연되여 가까이 배치되여있는 두 도체계를 **축전기**(또는 **콘덴샤**)라고 부르며 매 도체는 **축전기의 극**을 이룬다.

축전기에 전하가 쌓이는것을 **축전기의 충전**이라고 부르며 전하가 빠져나가는것을 **축전기의 방전**이라고 부른다.

축전기에서 두 도체는 평판, 원통 등 여러가지 모양을 가지게 되며 두 극사이에 놓이는 절연재료에 따라 여러 종류의 축전기들이 있다.

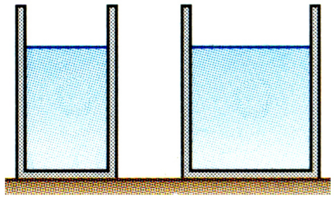
두 극에 걸어준 전압이 같다 하더라도 축전기의 종류에 따라 쌓이는 전기량(한 극판에 쌓인 전기량의 절대값)은 서로 다르다. 그러나 축전기에 쌓인 전기량과 걸어준 전압사이의 비는 주어진 축전기에 대하여 일정하다.

이 비를 **축전기의 전기용량** 간단히 **축전기의 용량**이라고 부른다. 즉

$$C = \frac{q}{U}$$ **축전기의 전기용량**

이처럼 <u>축전기의 전기용량은 극판사이의 전압을 단위(1V)만큼 높이기 위하여 주어야 할 전기량과 크기가 같은 량이다.</u>

축전기극판사이의 전압을 단위만큼 높일 때 더 많은 전기량을 담을수 있는 축전기일수록 그의 전기용량 즉 전하를 담을수 있는 용량이 크다. 이것은 마치 용량이 큰 물그릇일수록 물면의 높이를 단위만큼 높이기 위하여 더 많은 물을 담아야 하는것과 같다.(그림 1-62)


그림 1-62. 축전기의 용량과 그릇용량과의 비교

그러므로 전기용량은 축전기에 전하를 쌓을수 있는 정도를 평가하는 량이다.

전기용량의 단위는 1F(**파라드**)이다. 1F는 극판사이의 전압을 1V 높일 때 1C의 전기량이 쌓이는 축전기의 전기용량이다.

흔히 쓰이는 축전기의 전기용량은 1F에 비해 훨씬 작기때문에 1μF, 1nF, 1pF와 같은 단위들을 전기용량의 단위로 많이 쓴다.

$$1\mu F=10^{-6}F,\ 1nF=10^{-9}F,\ 1pF=10^{-12}F$$

평판축전기의 전기용량

동일한 두 금속판대기가 평행으로 가까이 놓이여 이루어진 축전기를 **평판축전기**라고 부른다.

평판축전기의 전기용량은 무엇에 관계되겠는가.

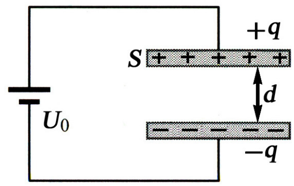


그림 1-63. 평판축전기

그림 1-63과 같이 면적이 S, 간격이 d인 평판축전기가 있다고 하자. 이 축전기에 q의 전기량이 쌓이고 극판사이의 전압이 U_0으로 되였다고 하자.

이때 극판의 면전하밀도는 $\sigma = q/S$ 로 된다. 따라서 극판사이에서 전기마당의 세기는 $E_0 = \sigma/\varepsilon_0$ 로 되고 극판사이의 전압은 $U_0 = E_0 d = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d$ 로 된다.

그러므로 평판축전기의 전기용량은

$$C_0 = \frac{q}{U_0} = \frac{\sigma S}{\frac{\sigma}{\varepsilon_0} d} = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

로 된다.

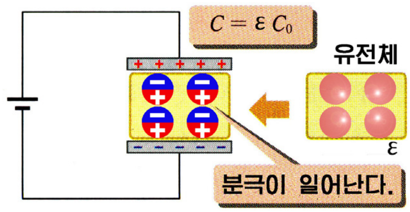


그림 1-64. 유전체를 끼운 평판축전기

평판축전기의 두 극판사이에 유전률이 ε인 유전체(절연재료)가 차있는 경우를 보자.(그림 1-64)

이때 유전체에서 분극이 일어나므로 극판사이에서 전기마당의 세기는 $E = \frac{E_0}{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$ 로 되며 전압은 $U = Ed = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0 \varepsilon}$ 로 표시된다. 그러므로 축전기의 전기용량은

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} = \varepsilon C_0 \quad \textbf{평판축전기의 전기용량}$$

와 같다.

이처럼 유전체를 끼우면 축전기의 전기용량이 ε배 커진다. 따라서 축전기를 제작할 때 유전률이 큰 유전체를 극판사이에 끼워줌으로써 전기용량을 크게 한다.

평판축전기의 전기용량은 극판의 면적과 유전체의 유전률에 비례하고 극판사이 간격에는 거꿀비례한다.

축전기에 어떤 한계이상의 전압을 걸어주면 극판사이의 유전체가 파괴되면서 축전기가 못쓰게 된다. 축전기에 걸어줄수 있는 전압의 한계값을 **절연내압**(또는 **파괴전압**)이라고 부른다.

모든 축전기들에는 그의 전기용량뿐아니라 절연내압이 표시되여있다.

해보기

TV나 콤퓨터 등의 전자제품안에 있는 회로판에서 10개이상의 축전기들을 찾아내여 그의 용량과 절연내압을 적어보아라.

도체구의 전기용량

도체구는 주위에 있는 다른 도체들과 하나의 축전기를 이룬다.

실례로 지구는 대기속의 이온층과 하나의 축전기를 이룬다.

도체구 A에 전기량 q를 주었을 때 구의 전위를 φ라고 하면 도체구의 전기용량은 다음과 같다.

$$C=\frac{q}{\varphi}$$

이 값은 도체구와 주위도체의 모양과 배치에 관계된다.

도체구주위에 아무런 도체가 없는 경우에 도체구는 **고립**되였다고 말한다.

고립된 도체구가 전기를 띠였을 때 전하가 구의 걸면에만 분포되므로 구면전하가 얻어진다.

이것의 전기마당은 그의 전기량 q가 구의 중심에 모인 점전하의 전기마당과 같다.(그림 1-65)

이로부터 도체구밖에서의 전위는 점전하의 전위식 $\varphi=k\frac{q}{r}$로서 표시된다.

그러므로 도체구의 반경을 a라고 하면 도체구의 걸면의 전위는 $\varphi=k\frac{q}{a}$로 표시된다. 따라서 고립된 도체구의 전기용량은 다음과 같다.

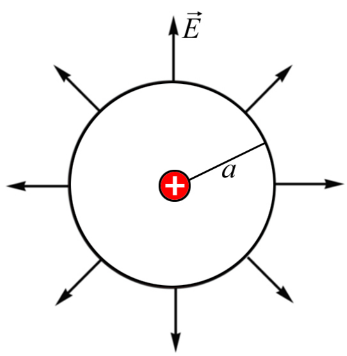


그림 1-65. 구면전하의 전기마당

$$C=\frac{q}{\varphi}=\frac{a}{k}=4\pi\varepsilon_0 a \qquad \text{고립된 도체구의 전기용량}$$

고립된 도체구의 전기용량은 그의 반경에만 비례한다.

금속구뿐아니라 송전선, 전화선 등도 땅면과 하나의 축전기를 이루며 전기용량을 가지고있다.

지구를 고립된 도체구로 보고 그의 전기용량을 구하면

$$C=4\pi\varepsilon_0 a=\frac{a}{k}=\frac{6.37\times10^6}{9\times10^9}\approx7\times10^{-4}(\mathrm{F})=700(\mu\mathrm{F})$$

와 같다. 이처럼 지구와 같이 큰 도체의 전기용량도 1F보다 대단히 작다.

실지 지구주위에는 대기의 이온층이 존재하므로 지구의 전기용량은 이 값보다 크다.

문 제

1. 용량이 다른 두 축전기 C_1, C_2($C_1>C_2$)에 대하여 다음의 판단에서 정확한것들을 선택하여라.
   ㄱ) 두 축전기에 걸어준 전압이 같을 때 C_1에 쌓인 전기량이 C_2보다 크다.
   ㄴ) 두 축전기에 걸어준 전압이 같을 때 C_1에 쌓인 전기량이 C_2보다 작다.
   ㄷ) 두 축전기에 쌓인 전기량이 같을 때 C_1에 걸린 전압이 C_2보다 크다.
   ㄹ) 두 축전기에 쌓인 전기량이 같을 때 C_1에 걸린 전압이 C_2보다 작다.
2. 어떤 축전기에 쌓인 전기량이 4×10^{-8}C만큼 증가할 때 극판사이의 전압이 20V만큼 높아졌다. 이 축전기의 전기용량은 얼마인가?
3. 평판축전기를 전압이 200V가 될 때까지 충전시킨 다음 전원을 떼고 극판사이의 거리를 3배로 늘구면 극판사이의 전압은 얼마로 되겠는가?

자료 전기용량식수감기

평판축전기의 전기용량이 극판의 면적, 간격, 유전체의 유전률에 관계된다는 원리는 전기용량식수감기에 리용된다.

만일 축전기의 용량을 결정하는 우의 세 량이 외부조건(습도, 변위, 압력 등)의 변화에 의해 달라진다면 축전기의 용량도 달라진다.

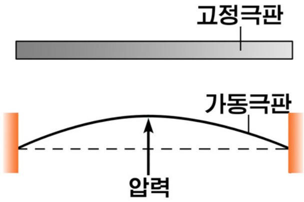


그림 1-66. 전기용량식 압력수감기원리

그러므로 평판축전기의 용량변화를 측정하여 여러가지 물리적량을 잴수 있다.

그림 1-66에는 작은 압력변화를 측정하는 전기용량식수감기의 원리를 보여주었다.

측정하려는 압력이 박막모양으로 된 평판축전기의 한 극에 가해지면 이것은 휘여든다.

따라서 극판사이의 간격이 변하고 수감기의 전기용량이 변화된다.

이처럼 전기용량의 변화를 측정하여 압력변화를 알아낼수 있다.

제 13 절. 축전기의 련결

축전기는 전기용량과 절연내압의 요구에 따라 각이하게 련결하여 쓴다.

축전기의 병렬련결

축전기를 병렬련결하면 전체 용량이 어떻게 되겠는가.

그림 1-67과 같이 용량이 C_1, C_2인 두개의 축전기를 병렬련결하고 여기에 전압 U를 걸어주었다고 하자.

매 축전기에 걸린 전압이 모두 U이므로 축전기들에 쌓이는 전기량은 각각

$$q_1 = C_1U, \qquad q_2 = C_2U$$

로 된다. 따라서 두 축전기에 쌓인 전체 전기량은

$$q = q_1 + q_2 = C_1U + C_2U = (C_1 + C_2)U$$

와 같다. 두 축전기렬을 전기용량이 C인 하나의 축전기로 볼 때 $q=CU$이므로

$$C = C_1 + C_2$$

로 된다.

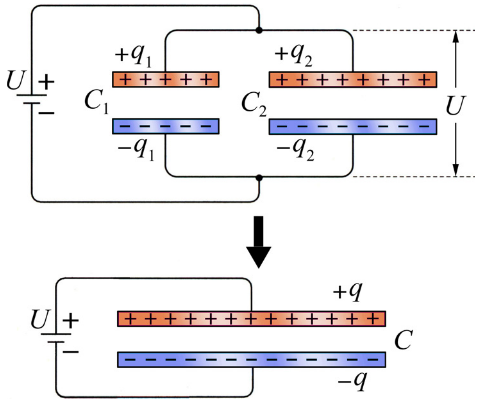


그림 1-67. 축전기의 병렬련결

일반적으로 용량이 C_1, $C_2, \cdots$, C_n인 n개의 축전기를 병렬련결하면 축전기렬의 전기용량은

$$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n = \sum C_i \qquad \text{병렬련결된 축전기렬의 전기용량}$$

로 된다. 즉 병렬련결된 축전기렬의 전기용량은 매 축전기의 전기용량들의 합과 같다.

병렬련결된 축전기렬의 절연내압은 모든 축전기들에 꼭같은 전압이 걸리므로 련결된 축전기들가운데서 절연내압이 제일 작은 축전기의것과 같다. 그리고 병렬련결된 축전기렬에서는 식 $q=CU$에 의해 전기용량이 큰 축전기에 더 많은 전기량이 쌓인다.

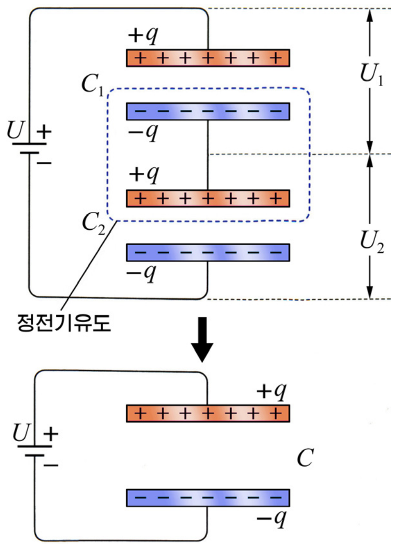


그림 1-68. 축전기의 직렬련결

축전기의 직렬련결

축전기를 직렬련결하면 전체 용량이 어떻게 되겠는가.

그림 1-68과 같이 용량이 C_1, C_2인 두개의 축전기를 직렬련결하고 여기에 전압 U를 걸어주었다고 하자.

이때 C_1의 웃극판과 C_2의 아래극판에는 q만 한 전기량이 쌓이고 이것들사이에 전기마당이 형성된다.

그런데 C_1의 아래극판과 C_2의 웃극판은 도선으로 서로 련결되여 하나의 도체를 이룬다. 따라서 축전기의 극판들이 매우 가까이 배치되여있으므로 정전기유도에 의해 이 도체를 이루는 매 극판들에는 부호는 다르지만 전기량이 q인 전하들이 쌓이게 된다.

그러므로 직렬련결된 축전기렬에서 매 축전기에 쌓이는 전기량은 같다. 이 경우 매 축전기에 걸리는 전압은 각각

$$U_1=\frac{q}{C_1},\qquad U_2=\frac{q}{C_2}$$

인데 이 전압들의 합이 외부전압과 같아야 한다. 즉

$$U=U_1+U_2=\frac{q}{C_1}+\frac{q}{C_2}=\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}\right)q$$

병렬련결된 두개의 축전기렬을 용량이 C인 하나의 축전기로 볼 때 $U=\frac{q}{C}$이므로

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}$$

로 된다. 일반적으로 용량이 C_1, $C_2, \cdots$, C_n인 n개의 축전기를 직렬련결하면 축전기렬의 용량은

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\ \cdots\ +\frac{1}{C_n}=\sum\frac{1}{C_i}$$ **직렬련결된 축전기렬의 전기용량**

로 표시된다. 이처럼 직렬련결된 축전기렬의 전기용량의 거꿀수는 매 축전기의 전기용량들의 거꿀수의 합과 같다. 따라서 축전기들을 직렬련결하면 전체 전기용량이 작아진다. 그러나 축전기렬의 절연내압은 커진다. 그리고 직렬련결된 축전기렬에서는 매 축전기에 쌓이는 전기량들이 같으므로 식 $U=q/C$에 의해 전기용량이 제일 작은 축전기에 제일 큰 전압이 걸린다.

생각하기 병렬 또는 직렬련결된 축전기렬의 전기용량을 평판축전기의 전기용량공식으로 설명할수 없겠는가를 생각해보아라.

[례제 1] 세개의 축전기를 그림 1-69와 같이 련결하고 그의 량쪽에 6V의 전압을 걸어주었다. 축전기렬의 전기용량과 0.2μF의 축전기에 쌓이는 전기량을 구하여라.

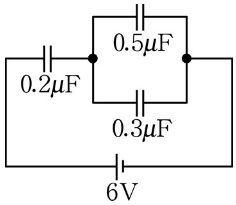


그림 1-69

풀이. 0.5μF의 축전기와 0.3μF의 축전기는 병렬련결되여있다. 따라서 이 두 축전기렬의 전기용량은

$$C'=0.5\times10^{-6}+0.3\times10^{-6}=0.8\times10^{-6}(\mathrm{F})$$

이다.

한편 0.2μF의 축전기와 C'는 직렬련결되였으므로 전체 축전기렬의 전기용량은 다음과 같다.

$$C=\frac{0.2\times10^{-6}\times0.8\times10^{-6}}{0.2\times10^{-6}+0.8\times10^{-6}}=0.16\times10^{-6}(\mathrm{F})=0.16(\mu\mathrm{F})$$

그리고 0.2μF의 축전기에 쌓이는 전기량은 다음과 같다.

$$q=CU=0.16\times10^{-6}\times6=0.96\times10^{-6}(\mathrm{C})$$

답. 0.16μF, 0.96×10^{-6}C

[례제 2] 절연내압이 모두 1 000V이고 전기용량이 각각 3μF, 4μF, 5μF인 세개의 축전기를 직렬련결하였다. 이 축전기렬의 절연내압을 구하여라.

풀이. 주어진것: $U_1=U_2=U_3=1\,000\mathrm{V}$

$C_1=3\mu\mathrm{F}$, $C_2=4\mu\mathrm{F}$, $C_3=5\mu\mathrm{F}$

구하는것: U?

직렬련결된 축전기렬에서는 전기용량이 제일 작은 축전기에 제일 큰 전압이 걸린다. 그러므로 C_1에 1 000V의 전압이 걸릴 때에 걸어준 전압이 축전기렬의 절연내압으로 된다.

이때 C_1에 쌓이는 전기량은

$$q=C_1U_1=3\times10^{-6}\times1\,000=3\times10^{-3}(\mathrm{C})$$

으로 된다.

이만한 전기량이 C_2과 C_3에도 쌓이므로 여기에 걸리는 전압은 각각

$$U_2'=\frac{q}{C_2}=\frac{3\times10^{-3}}{4\times10^{-6}}=\frac{3}{4}\times10^3\ (\mathrm{V})$$

$$U_3'=\frac{q}{C_3}=\frac{3\times10^{-3}}{5\times10^{-6}}=\frac{3}{5}\times10^3\ (\mathrm{V})$$

이다. 따라서 축전기렬에 걸리는 전압(절연내압)은 다음과 같다.

$$U=U_1+U_2'+U_3'=\left(1+\frac{3}{4}+\frac{3}{5}\right)\times10^3=2\,350\ (\mathrm{V})$$

답. 2 350V

문 제

1. 전기용량이 3μF인 축전기들을 어떻게 련결하면 전체 전기용량이 2μF로 되겠는가?
2. 평판축전기의 극판사이에 그림 1-70과 같이 유전률이 ε인 유전체를 끼웠다. 극판의 면적은 S이다. 이 축전기의 전기용량을 구하여라. 이런 모양의 축전기는 두개의 축전기가 병렬련결되였다고 본다.

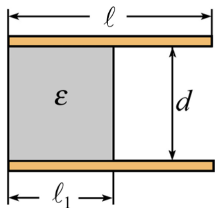


그림 1-70

3. 례제 1에서 0.3μF의 축전기에 쌓이는 전기량을 구하여라.

제 14 절. 전기마당의 에네르기

전하는 전기마당속에서 전기힘을 받아 움직이므로 마당은 전하를 옮기는 일을 한다. 이것은 전기마당이 에네르기를 가지고있다는것을 말하여준다. 이것은 또한 전기마당을 만들려면 일을 하여야 한다는것을 의미한다.

그러면 전기마당은 얼마만한 에네르기를 가지는가.

축전기에 저축된 에네르기

그림 1-71과 같이 전지를 써서 축전기를 충전한다고 하자.

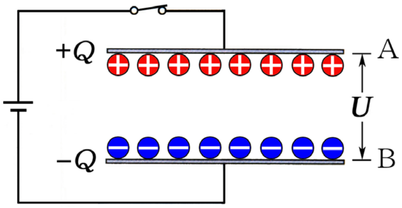


그림 1-71. 축전기의 충전

전기량보존법칙에 의해 이때 극판들에는 전하들이 새로 생기는것이 아니라 A판에 있던 전자들이 전지에 의해 B판으로 옮겨간다.

그러므로 전지는 A판에 있는 전자들을 끌어다 B판에 쌓는 일을 수행한다. 이때 수행된 일은 그대로 축전기에 저축된다.

축전기의 전기량이 Q 또는 전압이 U가 되게 하는데 전지가 수행한 일의 크기는 얼마나 되겠는가.

축전기에 쌓이는 전기량이 많아질수록 축전기의 전압은 식 $U=\dfrac{q}{C}$에 의해 높아질것이다. (그림 1-72)

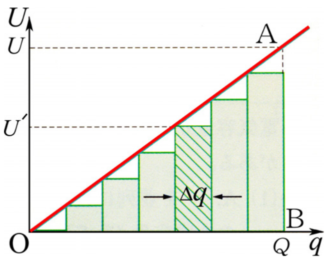


그림 1-72. 축전기에 저축된 에네르기의 계산

충전이 진행되는 어떤 순간에 A판의 전위를 φ_1, B판의 전위를 φ_2이라고 하자.

이때 전지가 요소전기량 Δq를 A판에서 B판으로 옮기는데 수행한 일은 Δq의 자리에네르기변화와 같다.

$$\Delta A=\Delta q(\varphi_1-\varphi_2)=\Delta qU'$$

이 일의 크기를 그림에서 보면 빗선을 친 요소직4각형의 면적과 같다.

이런 방법으로 충전의 매 순간마다 전기량을 옮기는데 수행한 일을 계산하여 합치면 그 크기는 그림에서 △OAB의 면적과 같다. 이 면적은 $\dfrac{1}{2}QU$와 같다.

이것이 바로 전지가 수행한 일 다시말하여 축전기에 저축된 에네르기의 크기이다. 즉

$$W=\frac{1}{2}QU=\frac{1}{2}CU^2=\frac{1}{2}\cdot\frac{Q^2}{C}$$ **축전기의 에네르기**

충전된 축전기의 두 극판을 도선으로 련결하면 방전하면서 에네르기가 나온다.(그림 1-73)

이것은 분명히 축전기에 저축된 에네르기가 열과 빛에네르기로 넘어가기때문이다.

방안에서나 저녁시간에 사진을 찍을 때를 보면 사진기가 자체로 밝은 빛을 내면서 필요한 조명을 보장한다.

이것은 바로 사진기안에 있는 축전기에 저축되였던 에네르기가 순간적으로 조명등에서 방출되면서 밝은 빛을 내기때문이다.

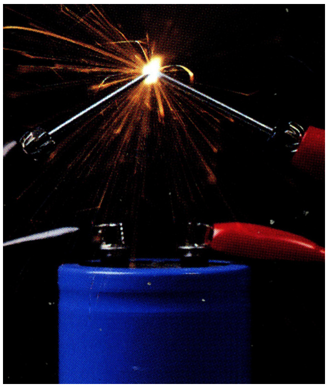


그림 1-73. 축전기의 방전

전기마당의 에네르기

축전기가 충전될 때 무엇이 새로 생기는가. 또 축전기가 방전될 때 없어지는것은 무엇인가.

축전기가 충전되면 두 극판사이에 전기마당이 새로 생긴다. 그리고 축전기가 방전되면 이 전기마당도 없어진다.

그러므로 축전기에 저축되는 에네르기는 바로 충전과 방전에 따라 생겼다없어졌다하는 전기마당이 가지고있는 에네르기로 보아야 한다.

축전기에 저축된 에네르기 다시말하여 전기마당의 에네르기를 전기마당의 세기 E로 표시해보자. 극판의 면적이 S이고 간격이 d인 평판축전기가 충전되여 전압이 U가 되였다고 하자.

극판사이에 생긴 전기마당의 세기가 E라면 극판전압은 $U=Ed$ 이다.

따라서 진공속에서 전기마당의 에네르기는

$$W=\frac{1}{2}CU^2=\frac{1}{2}\varepsilon_0\frac{S}{d}(Ed)^2=\frac{\varepsilon_0 E^2}{2}S\,d$$

로 표시된다.

여기서 $Sd=V$는 축전기극판사이에서 전기마당이 존재하는 구역의 체적이다. 이것을 고려하면 축전기에 있는 전기마당의 에네르기는

$$W=\frac{\varepsilon_0 E^2}{2}V$$

로 표시된다.

※ 극판간격이 좁을 때 전기마당은 축전기극판사이에만 존재한다고 볼수 있다.

단위체적속에 있는 전기마당의 에네르기를 **전기마당의 에네르기밀도**라고 부른다.

$$w=\frac{W}{V}=\frac{\varepsilon_0 E^2}{2}\qquad \text{전기마당의 에네르기밀도}$$

전기마당의 에네르기밀도를 알면 임의의 공간에 퍼져있는 전기마당의 에네르기를 쉽게 구할수 있다.

임의의 대전체가 만드는 전기마당의 경우에도 세기가 E인 곳에서 전기마당의 에네르기밀도는 웃식으로 표시된다.

[례제] 그림 1-74와 같은 회로에 대하여 다음 물음에 대답하여라.

ㄱ) 절환기를 S_1위치에 놓을 때 축전기 C_1에는 얼마만한 전기량이 쌓이며 얼마만한 에네르기가 저축되겠는가?

ㄴ) 이 상태에서 절환기를 S_2위치에 놓으면 축전기 C_2에 걸리는 전압, C_2에 쌓이는 전기량, C_2에 저축되는 에네르기는 얼마인가?

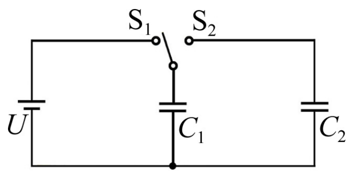


그림 1-74

풀이. ㄱ) C_1에 쌓이는 전기량은 $Q_1=C_1U$이고 저축되는 에네르기는 다음과 같다.

$$W_1=\frac{1}{2}Q_1U=\frac{1}{2}C_1U^2$$

ㄴ) C_1와 C_2이 병렬련결이므로 전체 전기용량은 C_1+C_2이 되고 Q_1의 전기량이 두 축전기에 나뉘여 쌓이게 된다. 이때 매 축전기에 걸리는 전압을 U'라고 하면

$$Q_1=C_1U=(C_1+C_2)U'$$

의 식이 성립한다. 따라서 C_2에 걸리는 전압은

$$U_2=U'=\frac{C_1}{C_1+C_2}U$$

로 되고 C_2에 쌓이는 전기량은

$$Q_2=C_2U_2=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}U$$

로 된다. 그리고 C_2에 저축되는 에네르기는 다음과 같다.

$$W_2=\frac{1}{2}Q_2U_2=\frac{1}{2}\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}U\cdot\frac{C_1}{C_1+C_2}U=\frac{1}{2}\frac{C_1^2C_2}{(C_1+C_2)^2}U^2$$

자료 **각종 에네르기밀도**

각이하게 보관되여있는 여러가지 에네르기밀도를 계산한데 의하면 다음과 같다.

에 네 르 기	에네르기밀도[J/m^3]
전기마당(10^5kV/m)	3.6×10^4
자기마당(10T)	4×10^7
물(100m 높이)	9.7×10^5
압축공기(5×10^6Pa)	1.8×10^7
끓는 물(100℃)	6.5×10^7

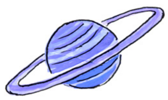
문 제

1. 전기용량이 C인 평판축전기를 전압 U로 충전시키고 전원을 뗐다. 그다음 극판간격을 원래의 절반되게 하였다. 이때 극판사이에서 전기마당의 세기, 축전기의 용량, 극판사이의 전압, 저축된 에네르기는 어떻게 변하겠는가?
2. 전기용량이 C인 평판축전기를 전압 U로 충전시킨 다음 전원을 떼고 여기에 유전률이 2인 유전체를 채웠다. 축전기에 저축된 에네르기가 얼마만큼 변하며 그 원인은 어디에 있겠는가?
3. 극판간격이 0.01mm인 평판축전기에 500V의 전압이 걸려있다. 이 축전기의 두 극판사이에서 한 변의 길이가 0.01mm인 요소바른6면체에 들어있는 전기마당의 에네르기를 구하여라.



문제: 점전하계의 등전위면과 전력선을 그리는 프로그람을 작성하여보아라.

방향:
- $x-y$자리표계를 선정하고 두개이상의 점전하의 전기량과 자리를 선택한다.
- x, y값에 따르는 전위를 구하는 프로그람을 작성한다.
- 차가 일정한 전위값들을 주어 전위가 같은 점들로 등전위면을 그린다.
- 등전위면에 수직으로 되는 전력선들을 일정한 간격으로 그린다.



복습문제

1. 꿀롱의 법칙에 대한 다음의 판단에서 정확한것들을 선택하여라.
   ㄱ) q_1, q_2은 변하지 않고 거리가 $r/2$로 되면 꿀롱힘은 두배로 커진다.
   ㄴ) r, q_1, q_2이 모두 두배 커지면 꿀롱힘은 변하지 않는다.
   ㄷ) q_1는 변하지 않고 q_2과 r가 절반으로 작아지면 꿀롱힘은 두배로 커진다.
   ㄹ) q_1와 q_2이 두배 커지고 r가 $\sqrt{2}$배 커지면 꿀롱힘은 두배로 커진다.
2. 길이가 ℓ=2m인 명주실로 꼭같은 두 도체구를 한 점에 걸었다. 두 구에 꼭같은 전기량 $q=2\times10^{-8}$C을 주었을 때 그들사이의 거리는 r=16cm로 벌어졌다.(그림 1-75) 실의 장력을 구하여라.

   (답. 3.5×10^{-3}N)

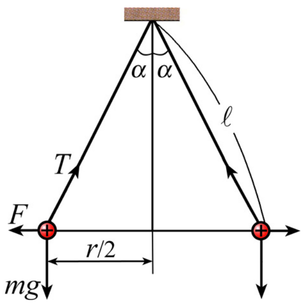


그림 1-75

3. 세개의 점전하 q_1=–3×10^{-8}C, q_2=1×10^{-8}C 및 $q_3 = 5\times10^{-8}$C 이 한 직선에 놓여있다. 점전하들사이의 거리는 r_{12} = 0.4m, r_{23} = 0.6m 이다.(그림 1-76) 매 점전하에 작용하는 전기힘을 구하여라.

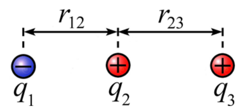


그림 1-76

(답. 3×10^{-5}N, 2.9×10^{-5}N, 10^{-6}N)

4. $+q$로 대전된 금속구 A와 $-2q$로 대전된 같은 크기의 금속구 B가 r만큼 떨어져 있을 때 작용하는 꿀롱힘은 F였다. 이제 두 구를 접촉시켰다가 그들사이의 거리를 $2r$로 되게 해주면 이때 두 구사이에 작용하는 꿀롱힘의 크기는 얼마인가?

$\left(\text{답. } \dfrac{F}{32}\right)$

5. 전기마당의 세기 $E=\dfrac{F}{q}$ 의 정의에 대하여 다음의 표현에서 정확한것들을 선택하여라.

ㄱ) 이 정의식은 점전하가 만드는 전기마당에 대해서만 성립한다.

ㄴ) 식에서 F는 전기마당속에 놓인 점전하가 받는 힘이고 q는 그의 전기량이다.

ㄷ) 식에서 F는 전기마당속에 놓인 점전하가 받는 힘이고 q는 이 전기마당을 만드는 전하의 전기량이다.

ㄹ) 두 점전하 q_1, q_2 이 r만큼 떨어져있을 때 $k\dfrac{q_2}{r^2}$ 은 q_1가 있는 위치에서 q_2 이 만드는 전기마당의 세기이다.

6. x축우에 전기량이 q_1, $-q_2$ ($q_1 = 2q_2$)인 두 점전하가 있다. 두 점전하가 만드는 전기마당의 세기를 E_1, E_2이라고 할 때 x축우에서 합성마당의 세기는 어떻게 되겠는가? 아래의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) E_1=E_2이면서 합성마당의 세기가 령인 점이 있다.

ㄴ) E_1=E_2인 두 점이 있는데 한 점에서는 합성마당의 세기가 령이고 다른 점에서는 $2E_2$이다.

ㄷ) E_1=E_2인 세 점이 있는데 두 점에서는 합성마당의 세기가 령이고 나머지 한 점에서는 $2E_2$이다.

ㄹ) E_1=E_2인 세 점이 있는데 한 점에서는 합성마당의 세기가 령이고 나머지 두 점에서는 $2E_2$이다.

7. 아래문장의 □안에 알맞는 글을 써넣어라.

양전하 Q가 만드는 전기마당의 어떤 점 P에 전기량이 $-q$인 음전하를 놓았더니 그것이 받는 힘은 F이고 방향은 북쪽으로 향하였다. 이때 P점에서의 전기마당의 세기는 □이고 방향은 □쪽으로 향한다. 만일 P점에 전기량이 $2q$인 양전하를 놓으면 그것이 받는 전기힘의 크기는 □이고 방향은 □쪽으로 향한다. 이때 P점의 전기마당의 세기는 □이고 방향은 □쪽으로 향한다.

8. 질량이 10^{-2}kg, 전기량이 $+2\times10^{-8}$C인 대전구를 실로 매여 드리웠다. 여기에 수평방향의 고른전기마당을 걸어주니 실이 30° 만큼 기울어졌다.(그림 1-77) 걸어준 전기마당의 세기를 구하여라. (**답**. 2.83×10^{6}N/C)

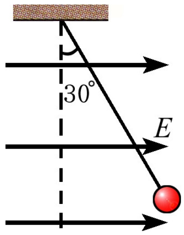


그림 1-77

9. 그림 1-78은 어떤 전기마당의 전력선이다. 전기마당의 세 점 A, B, C에 대하여 다음 물음에 대답하여라.

ㄱ) 어느 점의 전기마당의 세기가 제일 크고 어느 점에서 제일 작겠는가?

ㄴ) 매 점에서 전기마당의 방향을 표시해보아라.

ㄷ) 음전하를 매 점에 놓았을 때 음전하가 받는 힘의 방향을 표시해보아라.

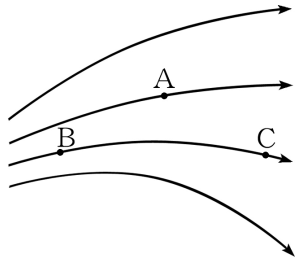


그림 1-78

10. 한개의 전자를 둘러싸는 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음은 얼마인가? (**답**. -1.8×10^{-8}N·m^2/C)

11. 한개의 점전하를 둘러싸는 닫긴곡면을 지나는 전력선묶음이 1.8×10^{-8}N·m^2/C인 때 점전하로부터 0.53×10^{-10}m의 거리에서 전기마당의 세기는 얼마인가? (**답**. 5.1×10^{11}N/C)

12. 무한히 긴 직선도선이 선전하밀도 τ(단위길이당 전기량)로 고르롭게 전하를 띠였다. 이것이 r만큼 떨어진 점에 만드는 전기마당의 세기를 가우스정리를 리용하여 구해보아라.

$$\left(\textbf{답}.\ E=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\tau}{r}\right)$$

13. 반경이 R인 구안에 전기량 Q가 고르롭게 분포되였다고 보고 이것이 만드는 전기마당의 세기를 구밖과 구안에서 계산하여보아라.

$$\left(\textbf{답}.\ E_{밖}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Q}{r^2},\quad E_{안}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{r}{R^3}\right)$$

14. 면전하밀도가 $\sigma=2\times10^{-5}$C/m^2인 무한평면전하가 만드는 전기마당속에서 선전하밀도가 $\tau=3\times10^{-6}$C/m인 무한직선전하의 매 1m에 작용하는 힘의 크기를 구하여라. (**답**. 3.4N)

15. 아래문장의 빈 칸에 알맞는 글을 써넣어라.

그림 1-79와 같은 양전하의 전기마당속에서 $q=2\times10^{-8}$ C의 양전하가 A점에서 B점까지 이동하였다. 이때 q의 자리에네르기가 6×10^{-7}J만큼 작아졌다. 그러므로 이 과정에 q가 받은 전기힘의 방향은 □로 향하고 힘의 크기는 점점 □졌다. 그리고 전기힘이 q에 대하여 수행한 일은 □J이다.

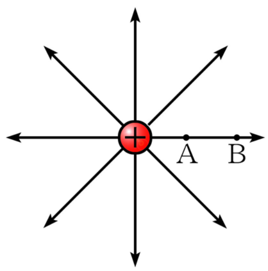


그림 1-79

16. 아래문장의 빈칸에 알맞는 글을 써넣어라.

질량이 m, 전기량이 $-q$인 음전하를 전기마당의 세기가 E인 고른전기마당속의 A점에 가만히 놓았다.(그림 1-80) 그러면 전하는 전력선과 □방향으로 처음속도가 령인 □운동을 한다. 이때 전하의 가속도는 □이며 B점에서의 속도가 v로 되였다면 A→B운동과정에 전기마당이 전하에 대하여 수행한 일은 □과 같다.

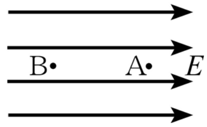


그림 1-80

17. 그림 1-81에서처럼 수직으로 서있는 두 평행평판에 전원을 련결하니 평판사이에 세기가 $E=3\times10^4$N/C인 고른전기마당이 생겼다. 이제 질량이 5g인 금속구를 실로 매달아 전기마당속에 놓으니 실이 30°의 각으로 기울어졌다.

ㄱ) 금속구가 띤 전기량의 크기와 부호를 결정하여라.

ㄴ) 실을 가만히 자르면 금속구는 어떤 운동을 하겠는가?

ㄷ) 오른쪽 판과 금속구사이의 거리가 0.06m라면 얼마 지나서 구는 오른쪽판대기에 도달하겠는가?($g=10\text{m/s}^2$으로 보고 계산하여라.)

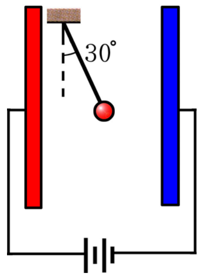


그림 1-81

(**답**. ㄱ) 9.62×10^{-7}C, 양전하 ㄴ) 수직선과 30°의 각을 이루는 방향에서 등가속직선운동 ㄷ) 0.144s)

18. 전기마당의 한 점으로부터 그보다 전위가 1V 높은 다른 점까지 전자가 가속되면서 갔다. 전자의 운동에네르기는 얼마나 변하였는가? 이때 자리에네르기는 얼마나 변하였겠는가?

(**답**. 1.6×10^{-19}J 증가, 1.6×10^{-19}J 감소)

19. 전기량이 -1.5×10^{-6}C인 음전하를 전기마당의 A점에서 B점까지 옮길 때 전기힘을 극복하면서 3×10^{-4}J의 일을 수행하였다. 전기마당의 C점은 A점보다 전위가 50V 높은데 이 전하를 B점에서 C점으로 이동시킬 때 전기힘이 수행한 일은 얼마이겠는가?

(**답**. 3.75×10^{-4}J)

20. 어떤 전하가 고른전기마당속의 A점에서 B점까지 그림 1-82와 같은 자리길을 따라 운동하였다. 점선 a, b, c, d는 등전위면이며 $\varphi_a < \varphi_b < \varphi_c < \varphi_d$ 이다. 전하에 작용하는 중력을 무시하는 조건에서 다음의 판단가운데서 정확한것들을 선택하여라.

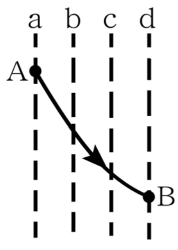


그림 1-82

ㄱ) 이 전하는 분명히 음전하이다.

ㄴ) A점에서 전하의 처음속도는 령이다.

ㄷ) A→B운동과정에 전하의 자리에네르기는 증가한다.

ㄹ) 전하의 운동에네르기와 전기힘의 자리에네르기의 합은 운동과정에 일정하다.

21. 그림 1-83에는 O점에 있는 점전하가 만드는 전기마당의 등전위면이 표시되여있으며 a점으로 입사한 어떤 대전립자의 운동자리길 abc가 점선으로 표시되여있다. 중력을 무시하는 경우 다음 판단들에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 대전립자는 운동의 전 구간에 전기적밀힘만을 받았다.

ㄴ) b점에서 대전립자의 자리에네르기는 a점에서보다 반드시 크다.

ㄷ) b점에서 대전립자의 속도는 a점에서보다 반드시 크다.

ㄹ) a점과 c점에서 대전립자의 속도의 크기는 같다.

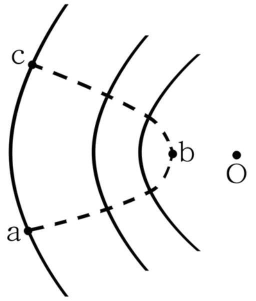


그림 1-83

22. 서로 반대부호로 대전된 두 평행평판사이에서 A점과 B 점사이의 거리는 2mm이고 이 두 점사이의 전위차는 2V이다.(그림 1-84) 두 평판사이의 간격이 5mm라면 극판사이에서 전기마당의 세기와 극판사이의 전압은 얼마이겠는가? (답. 2 000V/m, 10V)

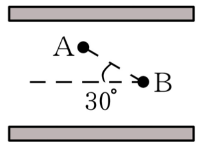


그림 1-84

23. 질량이 m, 전기량이 q인 대전립자가 v_0의 속도로 세기가 E인 고른전기마당에 수직으로 입사한다. 얼마만한 시간이 지나서 립자의 운동방향이 입사방향과 30°의 각을 이루며 이 과정에 립자의 운동에네르기는 얼마만큼 커지겠는가? 중력은 무시한다.

$$\left(\text{답. } \frac{mv_0}{\sqrt{3}qE},\quad \frac{1}{6}mv_0^2\right)$$

24. 그림 1-85에서 속도가 령인 전자는 전압 U_1의 가속전기마당에 의해 가속된 다음 전압 U_2의 편향전기마당에 의해 편향된다. 전자가 편향되는 각을 크게 하자면 어떻게 해야 하는가? 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) U_1와 U_2을 크게 해야 한다.

ㄴ) U_1를 작게 하고 U_2을 크게 해야 한다.

ㄷ) U_1는 크게 하고 U_2은 작게 하여야 한다.

ㄹ) U_1와 U_2을 작게 하여야 한다.

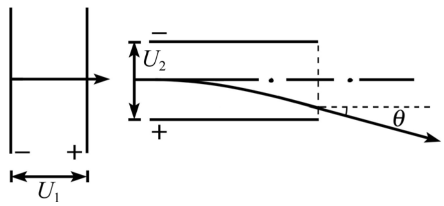


그림 1-85

25. 전자가 전압이 U인 전기마당에서 가속되여 극판사이의 거리가 d이며 전압 U'가 걸린 편향전극의 면에 평행으로 들어가 편향된 다음 형광막의 Q점에 떨어진다. 편향전극의 길이는 ℓ이고 그로부터 형광막까지의 거리는 L이다. 전자가 편향된 거리 y를 구하여라.(그림 1-86)

$$\left(\text{답. } y=\frac{U'\ell}{2dU}\left(L+\frac{\ell}{2}\right)\right)$$

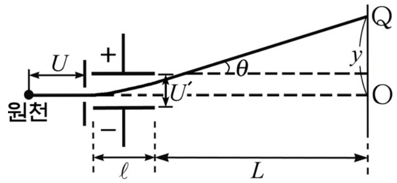


그림 1-86

26. 다음 문장들의 □안에 알맞는 글을 써넣어라.

ㄱ) 만일 도체를 전기마당속에 놓으면 전기마당의 작용으로 □가 생긴다. 그러므로 도체속에는 □가 령이 되고 도체속의 모든 점은 같은 □를 가진다. 그리고 도체의 겉면은 □면이다.

ㄴ) 도체속에서 전기마당의 세기가 령이므로 □정리에 따라 도체속에는 □가 없다. 도체에서 □는 오직 도체의 □에만 분포된다.

ㄷ) 도체의 겉면은 □면이므로 도체겉면에서 □은 도체겉면에 수직이다.

27. 길이가 ℓ인 대전되지 않은 도체막대기가 있다. 도체막대기의 끝에서 R만큼 떨어진 곳에 점전하 q를 놓았을 때 막대기의 량끝에 생긴 유도전하가 그의 중심에 만드는 전기마당의 세기를 구하여라.(그림 1-87)

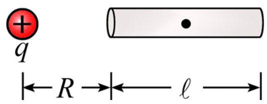


그림 1-87

(답. $k\dfrac{q}{\left(R+\dfrac{\ell}{2}\right)^2}$)

28. 전기용량이 40μF인 평판축전기가 7.6×10^{-4}C의 전기량으로 충전되여있다. 여기에 유전률이 5인 유전체를 채워넣으면 극판사이의 전압은 얼마로 되겠는가?

(답. 3.8V)

29. 극판사이에 운모를 끼운 평판축전기에 2.7×10^{-4}C의 전기량이 충전되여있다. 극판의 면적은 2 500cm^{2}이고 운모의 유전률은 7이다. 유전체속에서 전기마당의 세기를 구하여라.

(답. 1.74×10^{7} V/m)

30. 전기용량이 5pF인 평판축전기를 100V의 전압으로 충전시킨 다음 전원을 떼고 극판간격을 2배로 하였다. 전기용량, 극판사이의 전압, 극판사이의 전기마당의 세기의 변화를 구하여라. 그다음 극판사이에 유전률이 4인 유전체를 채웠다. 이때 전기용량, 극판사이의 전압을 구하여라.

(답. 2.5pF, 200V, 변하지 않는다, 10pF, 50V)

31. 평판축전기의 전압을 2배로 크게 하면서 전기마당을 절반으로 작게 하자면 어떻게 해야 하는가? 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 전기량을 2배로, 극판간격을 4배로 크게 해야 한다.

ㄴ) 전기량과 극판간격을 2배로 크게 해야 한다.

ㄷ) 전기량을 절반 작게 하고 극판간격을 4배로 크게 해야 한다.

ㄹ) 전기량을 절반 작게 하고 극판간격을 2배로 크게 해야 한다.

32. 용량이 4μF, 6μF, 8μF인 축전기 C_1, C_2, C_3을 병렬로 이었을 때 축전기의 용량은 얼마이겠는가? 여기에 20V의 전압을 걸어주었을 때 매개 축전기에 충전된 전기량은 각각 얼마이겠는가?

(답. 18μF, 8×10^{-5}C, 1.2×10^{-4}C, 1.6×10^{-4}C)

33. 전기용량이 2μF, 3μF인 축전기 C_1와 C_2이 각각 50V, 40V로 충전되였다. 그림 1-88에서 X와 Z는 +극, Y와 W는 −극이다. 이 극들을 다음과 같이 이을 때 축전기들의 극판사이전압과 C_1에 쌓이는 전기량을 구하여라.

ㄱ) X와 Z, Y와 W를 잇는 경우

ㄴ) X 와 W, Y와 Z를 잇는 경우

(답. ㄱ) 44V, 8.8×10^{-5}C ㄴ) 4V, 8×10^{-6}C)

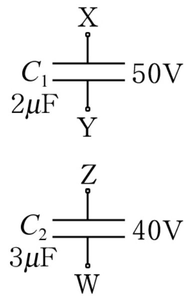


그림 1-88

34. 평판축전기의 극판사이에 그림 1-89와 같이 금속판을 넣었다. 극판의 면적은 S이다. 이 축전기의 전기용량을 구하여라.

$$\left(\text{답. } \varepsilon_0 \frac{S}{\ell - d}\right)$$

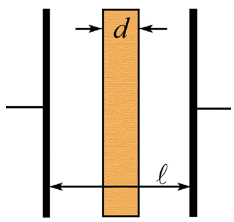


그림 1-89

35. 전기용량이 2μF, 3μF, 6μF인 축전기들을 직렬로 이었을 때 전체 전기용량은 얼마인가? 이때 매 축전기에 걸리는 전압의 비를 구하여라.

(답. 1μF, $U_1:U_2:U_3=1/C_1:1/C_2:1/C_3=1/2:1/3:1/6$)

36. 그림 1-90에서 전원의 전압은 500V이고 세개의 스위치는 열려있다. 처음에 C_1, C_2은 충전되여있지 않다.

ㄱ) 스위치 K_1와 K_3을 닫고 C_1를 충전시키니 3×10^{-3}C의 전기량이 쌓였다. C_1의 전기용량은 얼마인가?

ㄴ) 스위치 K_1를 닫은 상태에서 K_3을 열고 K_2을 닫았다. 충전, 방전이 진행된 다음 C_1에 걸리는 전압은 얼마이겠는가? C_2의 전기용량은 4μF이다.

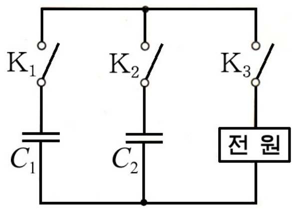


그림 1-90

ㄷ) ㄱ상태에서 ㄴ상태로 넘어갈 때 축전기에 저축된 에네르기는 얼마만큼 손실되겠는가?

(답. ㄱ) 6μF ㄴ) 300V ㄷ) 0.3J)

37. 극판간격이 d=0.01mm인 평판축전기에 500V의 전압이 걸렸을 때 생기는 전기마당의 에네르기밀도를 구하여라.

(답. 11 062J/m^3)

38. 25μF의 축전기 A를 400V의 전압으로 충전시킨 다음 전원을 떼고 여기에 전기용량이 같은 축전기 B를 병렬로 이었다.

ㄱ) A와 B의 전압은 얼마로 되겠는가?

ㄴ) A와 B가 가지는 에네르기는 얼마로 되겠는가?

ㄷ) 우의 에네르기를 A가 처음 가졌던 에네르기와 비교하고 그 차에 해당한 에네르기는 어떻게 되였겠는가를 설명하여라.

(답. ㄱ) $U_A=U_B$=200V ㄴ) $W_A=W_B$=0.5J ㄷ) ΔW =1 J)

제 2 장. 정상전류

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리 나라를 강성대국으로 만들자면 전기문제부터 풀어야 합니다. 전력은 인민경제의 생명선입니다.》

위대한 수령 **김일성**대원수님과 위대한 령도자 **김정일**대원수님의 현명한 령도에 의하여 우리 나라에는 많은 발전소들이 건설되여 전력을 생산하고있다.

발전소로부터 나라의 방방곡곡으로 뻗어나간 전기줄들을 따라 쉬임없이 흐르는 전류의 작용으로 공장과 농촌의 기계들이 돌아가고 학교와 가정들에서 전기를 쓰고 있다.

이 장에서는 정상전류가 흐르는 회로에서 성립하는 법칙들과 그와 관련한 현상들 그리고 전류의 리용에 대하여 학습한다.



제 1 절. 전 류

전류의 세기

금속안에는 자유전자들이 있고 전해질속에는 이온들이 있다. 이것들은 자유롭게 이동할수 있지만 보통상태에서는 무질서한 열운동을 하므로 어느 한쪽으로도 전기량을 나르지 못한다.

그러나 이와 같은 도체들에 전압을 걸어서 전기마당을 만들어주면 전하들은 무질서한 열운동을 하는 동시에 전기힘을 받아 한 방향으로 이동하면서 전류를 이룬다.(그림 2-1)

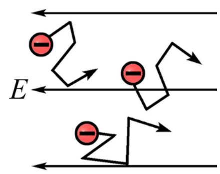


그림 2-1. 전기줄속에서 전자의 이동모양

전류가 흐르자면 물질속에 자유롭게 이동할수 있는 전하들이 있어야 하며 여기에 전압 즉 전기마당이 걸려야 한다. 이것이 전류가 흐를수 있는 조건으로 된다.

전류를 이루는 전자, 이온과 같은 전기띤 알갱이들을 **전기나르개**라고 부른다.

전류가 얼마나 센가 약한가 하는것은 1s동안에 도체의 자름면을 지나간 전기량으로 평가한다. 이것을 **전류의 세기**라고 부른다.

도체의 자름면을 지나 t 시간동안에 q 만 한 전기량이 지나갔을 때 전류의 세기는 다음과 같다.

$$I=\frac{q}{t}$$ **전류의 세기**

전류의 세기는 단위시간동안에 도체의 자름면을 지나간 전기량과 크기가 같은 량이다. 전류의 세기의 단위는 1A(암페아)이다.

전류의 방향은 양전하들의 이동방향으로 약속한다.

양전하들은 전기힘을 받아 항상 전기마당의 방향으로 이동한다. 그러므로 전류는 전기마당의 방향으로 다시말하여 전위가 높은쪽에서 낮은쪽으로 흐른다.

❓ 금속도체에서 전류의 방향은 어떠하겠는가.

금속에서는 음전하인 자유전자들이 전류를 이룬다. 따라서 금속에서는 전류의 방향이 실지 전류를 이루는 전자들의 이동방향과는 반대로 된다.(그림 2-2)

금속에서는 전자들이 비록 전류의 방향과 반대로 이동하지만 전류에 의해 나타나는 모든 전기적현상들은 양전하들이 전류의 방향으로 이동한것과 꼭같이 나타난다.

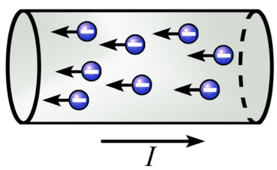


그림 2-2. 금속에서 전류

전기회로에서 한 방향으로만 흐르는 전류를 **직류**라고 부른다.

그리고 전류의 세기와 방향이 시간에 따라 변하지 않으며 회로의 모든 곳에서 세기가 같은 전류를 **정상전류**라고 부른다. 우리가 흔히 쓰는 전지에 의하여 흐르는 전류는 오랜 시간동안 정상전류로 볼수 있다.



정상전류가 흐르는 도선의 어떤 체적안에서 전기나르개의 수가 변하겠는가, 변하지 않겠는가?

전기나르개의 이동속도

전류의 세기는 도체가 주어진 조건에서는 전기나르개들이 얼마나 빨리 이동하는가 하는데 관계된다.

전류의 세기를 전기나르개의 평균이동속도로 표시해보자.

전류의 세기가 I인 도체안에서 전기나르개의 전기량을 q, 밀도(단위체적안의 전기나르개수)를 n, 평균이동속도를 v라고 하자.

도체의 자름면적을 S라고 할 때 이 면을 t 시간동안에 지나간 전기나르개들은 모두 밑면이 S이고 높이가 vt인 원기둥안에 있게 된다.(그림 2-3)

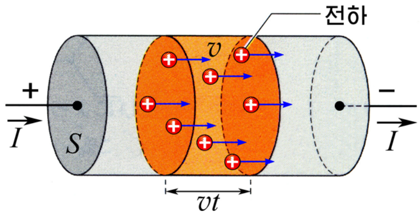


그림 2-3. 전기나르개수의 계산

이 수는 $N=nSvt$이며 이것들의 전체 전기량은 $Q=Nq=nSvtq$이다.



전류밀도

큰 도체덩어리로 전류가 흐를 때에는 도체의 한 자름면내에서도 자리에 따라 흘러가는 전기량이 서로 다르다. 그러므로 전류의 세기도 다르다. 도체의 한 자름면내에서도 어느곳에서 전류의 세기가 더 큰가 하는것을 단위자름면적을 지나는 전류의 세기로써 평가한다. 이것을 **전류밀도**라고 부른다.

전류방향에 수직인 도체의 어떤 자름면적 S로 흐르는 전류의 세기가 I인 때 전류밀도는 다음과 같다.

$$j=\frac{I}{S}$$

전류밀도는 전류방향에 수직인 도체의 단위면적으로 흐르는 전류의 세기와 크기가 같은 량이다.

전류밀도 j는 전류의 방향으로 향하는 벡토르량이다.

도체안에서 전하들이 골고루 분포되여 같은 속도로 이동하면서 전류가 흐를 때에는 도체의 매 부분들에서 전류밀도가 같다.

전류의 세기가 $I = Q/t$ 이므로 다음식이 성립한다.

$I = nqvS$	**전류의 세기와 전기나르개의 속도사이의 관계**

그러면 전기나르개의 이동속도는 얼마나 크겠는가.

학교의 총스위치를 넣으면 스위치로부터 가까운 교실이든 먼곳에 있는 교실이든 전등들이 동시에 켜진다.

그러면 전기줄속에 있는 자유전자들의 이동속도가 이렇게도 빠른가. 그렇지 않다.

자름면적이 1mm^2인 동선으로 2A의 전류가 흐른다고 보고 자유전자들의 이동속도를 계산해보자.

동에서 자유전자수의 밀도는 $8.5\times10^{28}\text{m}^{-3}$ 이므로 전류의 세기와 전기나르개의 속도사이의 관계식으로부터 전자들의 이동속도는

$$v = \frac{I}{enS} = \frac{2}{1.6\times10^{-19}\times8.5\times10^{28}\times10^{-6}} \approx 1.5\times10^{-4}(\text{m/s}) = 0.15(\text{mm/s})$$

와 같다.

이처럼 자유전자들의 이동속도는 1s 동안에 1mm 도 이동하지 못할 정도로 느리다.

그러나 전기줄속에서 자유전자들에 전기힘을 주어 전류를 흐르게 하는 전기마당의 전달속도는 빛속도와 비슷하다.

따라서 총 스위치를 넣는 순간 모든 전기줄들에서 전기마당이 거의 동시에 생겨나므로 전기줄속에 있던 자유전자들은 동시에 이동하면서 전류를 이루게 되고 전등들이 동시에 켜진다.



방안온도에서 자유전자들의 열운동속도는 얼마나 크겠는가?

[례제] 자동차의 전조등에 1.5A 의 전류가 흘렀고 전등을 10min 동안 켰다면 이때 전등을 지나 흐른 전기량은 얼마인가? 그동안에 자유전자 몇개가 지나갔겠는가? 이때 전등에 흐르는 전류는 정상전류라고 본다.

풀이. 주어진것: I=1.5A

t=10min=600s

$e=1.6\times10^{-19}$C

구하는것: q?, n?

$I=q/t$ 로부터

$$q = It = 1.5\times600 = 900\ (\text{C})$$

전자 한개의 전기량은 $e = 1.6\times10^{-19}$ C 이므로 $q = ne$ 로부터

$$n=\frac{q}{e}=\frac{900\text{C}}{1.6\times10^{-19}\text{C}}=5.625\times10^{21}$$

답. 900C, 5.625×10^{21} 개

문제

1. $1\,\mu$A 의 전류가 흐르는 전기줄에서 1s사이에 전기줄의 자름면을 지나는 전도전자의 수는 얼마인가?
2. 전류가 흐르는 전지내부에서는 양이온들과 음이온들이 서로 반대방향으로 이동하면서 전류를 이룬다. 양이온 및 음이온에 의한 전류의 세기를 각각 $I_{양}$, $I_{음}$ 이라고 하면 전지내부에서 전체 전류의 세기는 얼마이겠는가?
3. 원자에서 전자가 핵주위로 운동하는것을 하나의 원전류로 볼수 있다. 수소원자에서 하나의 전자가 반경이 r인 원자리길을 따라 속도 v로 운동한다고 볼 때 이 원전류의 세기는 얼마이겠는가? 전자의 전기량은 e이다.

제 2 절. 부분회로의 옴의 법칙

부분회로의 옴의 법칙과 전압강하

도이칠란드의 물리학자 옴(1787-1854)은 도체로 흐르는 전류의 세기는 그의 량쪽에 걸어준 전압에 비례한다는것을 실험을 통하여 밝혀냈다. 즉

$$I=kU$$

비례결수 k가 큰 도체일수록 같은 전압하에서도 더 큰 전류가 흐른다. 그러므로 k는 주어진 도체가 전류를 얼마나 잘 흐르게 하는가를 나타내는 량으로 된다. 이것을 **전기전도도**라고 부른다.

반대로 k의 거꿀수는 도체가 전류를 얼마나 잘 흐르지 못하게 하는가를 나타내는 량으로서 전류에 대한 도체의 저항을 나타낸다. 그러므로 량 $R=1/k$을 **전기저항** 간단히 **저항**이라고 부른다.

옴이 밝힌 법칙을 전기저항 R로써 표시하면 다음과 같다.

$$I=\frac{U}{R}\qquad \textbf{부분회로의 옴의 법칙}$$

즉 <u>도체에 흐르는 전류의 세기는 걸어준 전압에는 비례하고 도체의 저항에는 거꿀비례한다</u>. 이것을 **부분회로의 옴의 법칙**이라고 부른다.

저항의 단위는 1Ω(옴)이다. 1Ω은 1V의 전압에 의해 1A의 전류가 흐르는 도체의 저항이다.

$$1\Omega=1\text{V/A}$$

도체에 걸어준 전압을 변화시키면서 거기에 흐르는 전류를 재서 그린 그라프를 $U-I$ **그라프**라고 부른다.

옴의 법칙이 성립하는 도체들의 $U-I$ 그라프는 직선으로 된다.(그림 2-4) 금속과 전해질이 이러한 도체에 속한다.



전류계와 전압계를 리용하여 어떤 금속선의 U-I 그라프를 그려보아라.

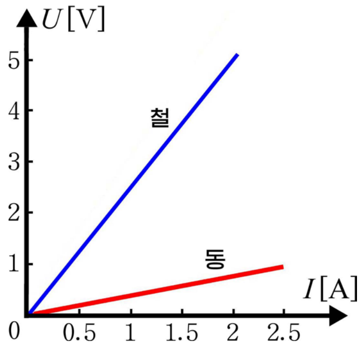


그림 2-4. ***U-I*** 그라프

그러나 어떤 도체들의 저항은 거기로 흐르는 전류의 세기에 따라서 변한다.

이러한 도체들의 U-I그라프는 곡선으로 되며 옴의 법칙이 성립하지 않는다.(그림 2-5)

그러나 매 순간의 저항값은 그때의 전압을 그때에 흐르는 전류의 세기로 나눈 값으로 결정된다. 전기띤 기체들과 반도체소자 등이 이러한 도체에 속한다.

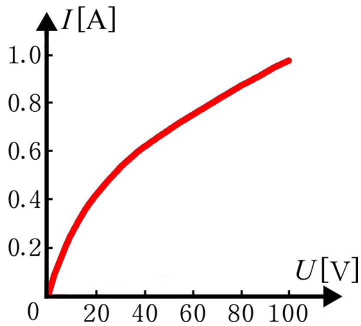


그림 2-5. ***R*** 값이 변하는 도체의 ***U-I*** 그라프

부분회로의 옴의 법칙을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$U=IR$$

이 식에 의하면 저항이 R인 도체에 전류 I가 흐르면 도체의 량쪽에는 항상 전압(전위차) $U=IR$가 생긴다는것을 알수 있다.

이처럼 저항을 가진 도체에 전류가 흐를 때 도체의 량단에 나타나는 전압 $U=IR$ 를 **전압강하**라고 부른다.

전류는 전위가 높은쪽에서 낮은쪽으로 흐른다. 그러므로 저항을 가진 도체에서는 전류가 흐르는 방향으로 가면서 전위가 $U=IR$만큼 낮아진다.(그림 2-6) 이런 의미에서 전압강하라고 부르는것이다.

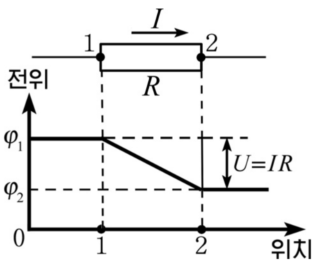


그림 2-6. 전압강하

비 저 항

도선의 저항은 그의 길이와 굵기에 어떻게 관계되는가.

도선의 저항은 재질이 주어진 조건에서는 그의 굵기와 길이에 관계된다. 도선의 길이가 길면 그것은 많은 짧은 도선들을 직렬로 이은것이나 같으므로 저항이 클것이고 도선이 굵으면 그것은 많은 가는 도선들을 병렬로 이은것이나 같으므로 저항이 작을것이다.

따라서 도선의 저항은 그의 길이에는 비례하고 자름면적에는 거꿀비례한다. 즉

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$ **도선의 저항**

여기서 ρ 는 오직 도선의 재질에만 관계되고 그의 길이나 자름면적에는 무관계한 량으로서 이것을 **비저항**이라고 부른다.

길이와 자름면적이 같은 도선들이라고 하여도 비저항이 큰 재질로 된 도선의 저항값이 더 크다. 비저항의 단위는 1Ω·m 이다.

아래의 표에는 20℃에서 가지게 되는 각이한 재질들의 비저항값을 제시하였다.

몇가지 금속들의 비저항

재 질	비저항[Ω·m]	재 질	비저항[Ω·m]
은	1.62×10^{-8}	철	9.8×10^{-8}
동	1.72×10^{-8}	망가닌	4.4×10^{-7}
알루미니움	2.8×10^{-8}	수은	9.6×10^{-7}
월프람	5.3×10^{-8}	니크롬	1.09×10^{-6}

※ 망가닌은 동, 니켈, 망간의 합금이고 니크롬은 니켈, 크롬, 망간 등의 합금이다.

비저항이 작은 동선이나 알루미니움선은 전기선으로 많이 쓰고 비저항이 큰 니크롬선이나 망가닌선은 저항선으로 쓴다.



집에 있는 전기담요선의 저항과 굵기, 길이를 측정하여 그의 비저항을 계산해보아라. 어느 물질의 비저항과 비슷한가?

금속재질들의 비저항은 온도가 높아짐에 따라서 커진다. 그것은 온도가 높아지면서 금속을 이루고있는 양이온들의 열운동이 심해져 전류를 이루는 자유전자들과 더 자주 부딪치면서 전류의 흐름을 더 세게 방해하기때문이다.

실험에 의하면 0℃인 때 금속의 비저항이 ρ_0 이라면 t℃인 때는 다음과 같이 표시된다.

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$ **온도에 따르는 비저항**

여기서 α 를 금속의 **저항온도결수**라고 부른다. 이 값은 금속에 따라 각이한 값을 가지며 α 의 값이 큰 금속일수록 온도에 따라 저항값이 크게 변한다.

웃식의 량변에 도선의 길이와 자름면적의 비 ℓ / S 를 곱하면 온도에 따르는 도선의 저항식이 얻어진다. 즉

$$R = R_0(1+\alpha t)$$

아래의 표에 몇가지 금속들의 저항온도결수를 주었다.

몇가지 금속의 저항온도결수

금 속	α [K^{-1}]	금 속	α [K^{-1}]
은	3.6×10^{-3}	철	6.6×10^{-3}
동	3.9×10^{-3}	망가닌	1×10^{-5}
알루미니움	4.9×10^{-3}	니크롬	1×10^{-4}

※ 반도체는 금속과 반대로 온도가 올라가면 그의 저항이 작아진다.

금속의 저항이 온도에 따라서 변하는 현상은 온도를 재거나 온도를 자동조종하는데 리용된다.

온도에 따라서 저항이 잘 변하는 금속선을 감아서 만든 저항기를 온도수감부로 쓴 온도계를 **금속저항온도계**라고 부른다.

백금선의 저항은 비교적 넓은 온도구간에서 온도에 따라서 비례하여 커지기때문에 저항온도계로 많이 쓰인다. 백금저항온도계로써는 -260～600℃의 온도를 0.001℃의 정밀도로 잴수 있다.

온도에 따라 저항이 잘 변하지 않는 금속들은 표준저항을 만드는데 쓰인다.

참고 전류가 많이 흐르면 왜 전압이 낮아지는가

우리는 이따끔 전기를 많이 쓰는 저녁에는 전등불이 약간씩 어두워졌다가 야밤에 다시 밝아지는 현상을 목격하게 된다.

전등불이 어두워진다는것은 전등으로 흐르는 전류의 세기가 작아졌다는것이며 이것은 곧 전등에 걸리는 전압이 낮아졌음을 보여준다.

그러면 왜 이런 현상이 나타나겠는가.

가정들에 전기를 공급하는 전기줄들은 일정한 저항을 가지고있으므로 전류가 흐를 때 여기서 전압강하가 생긴다. 그러므로 변압기에서 내는 전압의 일부가 전기줄에서 떨어진다.

저녁에는 모든 가정들에서 전등이나 TV를 비롯한 전기용품들을 다른 때보다 더 많이 쓰므로 전기줄로 더 큰 전류가 흐르게 된다. 따라서 전기줄에서 생기는 전압강하가 커지므로 여기에서 떨어지는 전압이 커져 가정들에 들어오는 전압이 약간씩 낮아지게 된다.

전기용접을 하는 경우 전등불이 껌빡거리는것도 이것으로써 설명된다.

문 제

1. 길이가 ℓ=20cm이고 직경이 d=2mm인 흑연연필심의 량쪽에 U=6V의 전압을 걸면 심으로 얼마의 전류가 흐르겠는가? 흑연의 비저항은 $\rho=4\times10^{-4}\ \Omega\cdot\text{m}$이다.

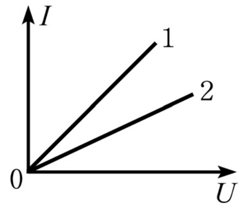


그림 2-7

2. 그림 2-7에서 그라프 1과 2는 각각 저항 R_1와 R_2의 U-I 그라프이다. 이 그림으로부터 알수 있는것은 무엇인가? 아래의 판단에서 정확한것들을 선택하여라.
   ㄱ) R_1의 저항값이 R_2보다 크다.
   ㄴ) R_1의 저항값이 R_2보다 작다.
   ㄷ) 전압이 증가할 때 R_1와 R_2은 모두 증가한다.
   ㄹ) 전압이 증가할 때 R_1와 R_2은 변하지 않는다.

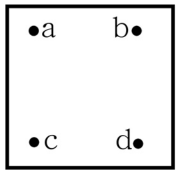


그림 2-8

3. 그림 2-8에서처럼 네개의 단자 a, b, c, d가 있는 《검은함》이 있다. 함안에는 꼭같은 저항들로만 된 회로가 구성되여있는데 ab사이의 저항을 재니 ac사이의 저항의 3배이고 cd사이의 저항은 ab사이의 저항과 같았다. 4개의 저항을 가지고 회로를 구성하여보아라.

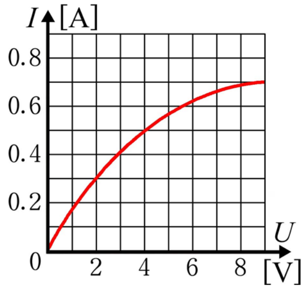
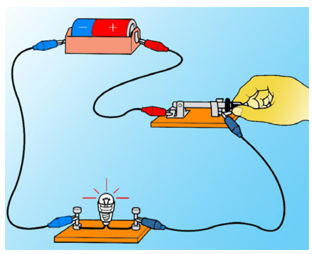


그림 2-9

4. 그림 2-9에는 어떤 전등의 $U-I$ 그라프를 주었다. 이러한 전등 3개를 직렬련결하고 그의 량쪽에 12V의 전압을 걸어주었다. 이때 얼마만한 전류가 흐르겠는가?

제 3 절. 닫긴회로의 옴의 법칙

전등에 전지를 련결하고 스위치를 닫으면 전류가 흐르면서 전등에 불이 켜지게 된다.(그림 2-10) 전지가 들어있는 회로가 닫기면 여기에 정상전류가 흐른다고 볼수 있다.


그림 2-10. 닫긴회로

전원과 전동력

충전된 축전기의 두 극판에 도선을 련결하여 회로를 닫으면 방전하면서 전류가 순간적으로 흐르고만다. 이런 회로에 전류가 계속 흐르게 하자면 축전기의 +극판으로 몰려온 전자들을 −극판으로 계속 떼여넘겨야 한다. 전지는 바로 이와 같은 역할을 한다.

전지와 같이 닫긴회로에서 전류가 계속 흐르도록 하는 장치를 **전원**이라고 부른다. 건전지, 축전지와 같은 화학전지뿐아니라 빛전지, 발전기 등도 모두 전원에 속한다.

전원은 어떻게 닫긴회로에서 전류가 계속 흐르도록 하는가.

이것을 볼타전지를 실례로 하여 살펴보자.

볼타전지는 류산용액속에 잠근 아연전극과 동전극으로 되여있다.(그림 2-11)

아연전극에서는 양이온(Zn^{2+})이 용액속으로 풀려나가는 화학반응이 일어나므로 아연전극은 －전하를 띠게 된다. 그리고 동전극에서는 용액속의 양이온(H^+)을 끌어당기는 화학반응이 일어나므로 동전극은 ＋전하를 띠게 된다. 그리하여 동전극과 아연전극사이에는 전위차가 생기는데 이 크기가 어느 정도에 이르면 우의 화학반응이 멎게 된다.

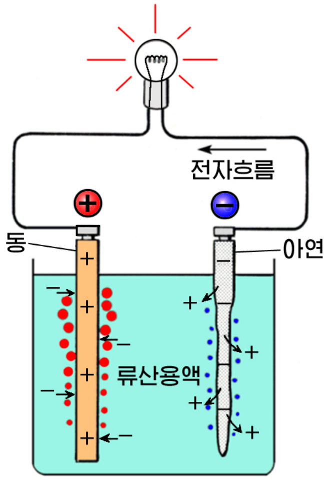


그림 2-11. 볼타전지

두 전극사이에 전등과 같은 부하를 련결하면 아연전극으로부터 동전극으로 전자들이 이동하면서 전류가 흐른다. 이때 동전극과 아연전극사이의 전위차가 낮아지게 된다. 그러면 전극들에서는 화학반응이 다시 일어나는데 이것은 마치 전지가 동전극으로 넘어온 전자들을 다시 아연전극으로 넘겨주는 일을 하는것과 같다. 이때의 일은 전기힘과 다른 비전기적힘(화학반응)이 수행한다.

그러므로 전류가 흐르는 과정에 두 전극사이의 전위차는 일정하게 유지되며 닫긴회로로 전류가 오래동안 흐를수 있다.

양수기는 흘러내려온 물을 다시 퍼올려 그의 자리에네르기를 높여주는 일을 한다. 마찬가지로 닫긴회로를 따라서 전하들이 한바퀴 돌 때 전원도 이것들의 자리에네르기(또는 전위)를 다시 높여준다. 이때 전원이 내는 비전기적힘은 일을 수행하는데 이것을 가지고 전원을 평가할수 있다.

닫긴회로를 따라서 1C의 전기량이 한바퀴 돌 때 전원의 비전기적인 힘이 하는 일을 전원의 **전동력**이라고 부르며 기호 $\mathscr{E}$으로 표시한다. 즉

$$\mathscr{E}=\frac{A}{q} \qquad \text{전 동 력}$$

전동력의 단위도 전압과 같이 1V이다.

우리가 흔히 쓰는 건전지의 전동력은 1.5V이며 대형발전기의 전동력은 수천~수만V에 달한다.

닫긴회로로 전류가 흐를 때에는 전원내부에서도 전류가 흐른다. 전원내부에서 전하들의 이동도 일정한 저항을 받는데 이 저항을 전원의 **내부저항**이라고 부르며 기호 r로 표시한다.

닫긴회로의 옴의 법칙

닫긴회로에 흐르는 전류의 세기는 무엇에 관계되겠는가.

그림 2-12에서처럼 전동력이 $\mathcal{E}$이고 내부저항이 r인 전원에 부하 R를 련결하였을 때 전류 I가 흐른다고 하자. 이때 전원밖의 회로를 **외부회로**, 전원안의 회로를 **내부회로**라고 부른다. 내부회로는 전동력과 내부저항 r로 이루어졌다고 볼수 있다.

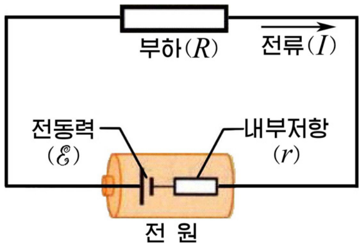


그림 2-12. 닫긴회로의 옴의 법칙

1C의 전하가 전기힘을 받아서 외부회로를 따라 전원의 ＋극에서 －극으로 옮겨갔다고 하자. 이때 전하의 자리에네르기는 낮아지는데 낮아진 자리에네르기 즉 전기힘이 하는 일은 외부저항 R와 내부저항 r에서의 전압강하의 합과 같다. 즉

$$U = IR + Ir$$

전원은 이렇게 낮아진 전하의 자리에네르기를 다시 원래만큼 높여주면서 전하를 －극에서 ＋극으로 끌어온다. 이때 단위전기량(1C)에 대하여 전원의 비전기적인 힘이 하는 일의 크기가 바로 전원의 전동력이다. 그러므로

$$\mathcal{E} = A/q = U = IR + Ir$$

이 식으로부터 닫긴회로에 흐르는 전류의 세기를 구하면 다음과 같다.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$ **닫긴회로의 옴의 법칙**

이처럼 닫긴회로에 흐르는 전류의 세기는 전원의 전동력에는 비례하고 전체 저항(외부저항과 내부저항의 합)에는 거꿀비례한다. 이것을 **닫긴회로의 옴의 법칙**이라고 부른다.

※ 전하가 전원의 ＋극에서 －극으로 외부회로를 따라 옮겨갈 때에 수행하는 일은 전기힘에 의해 수행된다. 전하가 닫긴회로를 따라 한바퀴 돌 때 전원은 오직 전원의 －극에서 ＋극으로 전하를 옮기는데만 일을 수행한다.

단락전류와 단자전압

닫긴회로에서 외부회로의 저항이 령이라고 볼수 있는 경우(전원의 두 극을 저항이 령인 도선으로만 이은 경우)에는 회로로 흐르는 전류의 세기가

$$I_{단} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$ **단락전류**

으로서 최대가 된다. 이런 상태를 **단락(합선)상태**라고 부르며 이때 흐르는 전류를 **단락전류**라고 부른다.

단락전류는 전동력이 작은 건전지 같은데서는 그리 크지 않다.

그러나 축전지나 발전기 그리고 변압기 2차권선과 같이 전동력이 크고 내부저항이 작은 전원들에서는 단락전류의 세기가 전기설비들을 못쓰게 만들 정도로 대단히 크다.

그러므로 이런 전원을 쓰는 전기회로들에서는 안전기(휴즈)를 설치하여 단락전류에 의한 위험을 미리막는다.

전원의 두 극사이에 걸리는 전압 즉 내부회로의 량쪽에 걸리는 전압을 **단자전압**이라고 부른다.

그림 2-13에 닫긴회로에 전류 I가 흐를 때 전동력 $\mathscr{E}$과 내부저항 r에서의 전위의 변화곡선을 주었다.

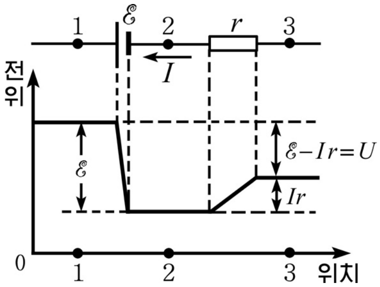


그림 2-13. 단자전압의 유도그림

여기서 알수 있는것처럼 단자전압은 $U=\mathscr{E}-Ir$와 같다. 따라서 단자전압은

$$U=\mathscr{E}-Ir=IR$$

로 표시된다. 식으로부터 단자전압은 부하에서의 전압강하와 같다는것을 알수 있다.

단자전압은 전원으로 흐르는 전류의 세기가 클수록 작아진다. 그것은 전원의 전동력은 일정한 반면에 이와 극성이 반대로 생기는 내부저항 r에서의 전압강하가 커지기때문이다.

회로가 열렸을 때에는 전류가 흐르지 않으므로(I=0) 전원의 단자전압은 전원의 전동력과 같게 된다.

문 제

1. 그림 2-14에서 R_1=14Ω, R_2=9Ω이다. 스위치 S를 1위치에 놓았을 때 전압계는 U_1=2.8V를 가리키고 2위치에 놓았을 때에는 U_2=2.7V를 가리켰다. 전지의 전동력과 내부저항을 구하여라. 전압계의 내부저항은 무한대로 본다.

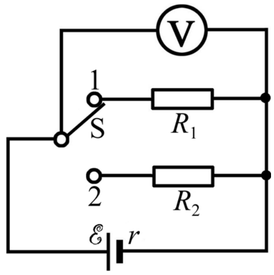


그림 2-14

2. 그림 2-15에서 R_1=6Ω, R_2=4Ω이고 전압계는 3.6V를 가리킨다. 전지의 내부저항이 r=4Ω이라면 전류계는 얼마를 가리키고 전지의 전동력은 얼마이겠는가? 전압계의 내부저항은 무한대이고 전류계의 내부저항은 령이다.

3. 전동력이 240V이고 내부저항이 0.4Ω인 발전기로 저항이 1.2kΩ인 전등 200개에 전기를 공급한다. 전등에 걸리는 전압은 얼마인가? 같은 전등 100개를 더 쓴다면 전등에 걸리는 전압은 얼마로 되는가? 여기서 무엇을 알수 있는가? 전등들은 모두 병렬로 련결한다.

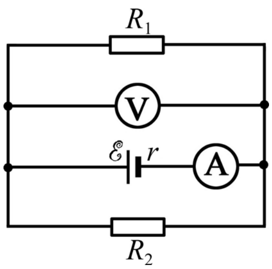


그림 2-15

제 4 절. 키르흐호프의 법칙

전기회로에는 여러개의 전원과 저항이 들어있기도 하고 또 그물처럼 복잡하게 엉겨있는 경우도 많다. 이런 회로들에서는 전류의 세기나 전압 등을 옴의 법칙만 가지고 간단하게 구할수가 없다.

키르흐호프의 법칙에 의하여 복잡한 회로에서 전류의 세기나 전압, 저항 등을 계산할수 있다.

전원을 포함한 부분회로의 옴의 법칙

부분회로에 전원이 들어있으면 옴의 법칙이 어떻게 표시되겠는가.

그림 2—16과 같이 전원을 포함한 부분회로의 량단에 전압 U가 걸렸다고 하자.

이와 같은 회로를 고찰할 때에는 반드시 회로의 방향을 지적해주어야 한다.

회로의 방향을 오른쪽으로 향하게 잡자.

회로로는 얼마의 전류가 어느 방향으로 흐르겠는지는 모르지만 I만 한 전류가 회로방향으로 흐른다고 가정하자.

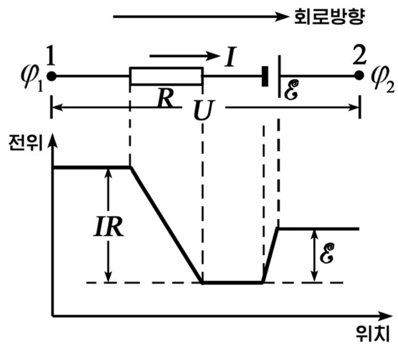


그림 2-16. 전원을 포함한 부분회로

이 경우 회로의 매 점들에서 전위의 변화곡선(전원의 내부저항은 무시하든가 R에 포함시킨다.)을 보고 알수 있는것처럼

$$\varphi_1-\varphi_2=U=IR-\mathscr{E}$$

으로 된다. 여기서 전류의 세기를 구하면

$$I=\frac{U+\mathscr{E}}{R}$$

이 얻어진다.

만일 전지가 그림과 반대로 놓여있다면

$$\varphi_1-\varphi_2=U=IR+\mathscr{E}$$

이므로 전류의 세기는 $I=\dfrac{U-\mathscr{E}}{R}$으로 된다.

따라서 전원을 포함한 부분회로로 흐르는 전류의 세기는

$$I=\frac{U\pm\mathscr{E}}{R}$$ 전원을 포함한 부분회로의 옴의 법칙

이처럼 전원을 포함한 부분회로에 흐르는 전류의 세기는 회로에 걸린 전압과 전원의 전동력의 합(또는 차)에 비례하고 회로의 전체 저항에는 거꿀비례한다. 이것을 **전원을 포함한 부분회로의 옴의 법칙**이라고 부른다.

※ 전동력의 부호는 회로방향으로 가면서 전원의 극의 전위가 높아지면 ＋로, 낮아지면 －로 잡는다.

전류가 회로방향과 반대로 흐른다고 가정하였을 때에는 웃식이 $-I=\frac{U\pm\mathscr{E}}{R}$ 으로 표시된다.(그림 2-16과 같은 전위곡선을 그리고 따져볼것.)

전원을 포함한 부분회로의 옴의 법칙으로 구한 전류의 세기의 값이 부의 값으로 나오면 그것은 회로로 흐르는 전류의 세기가 이미 가정한 방향과 반대이라는것을 의미한다.

키르히호프의 제1법칙

이 법칙은 회로의 분기점에서 성립하는 법칙이다. 정상전류가 흐르는 회로의 한 분기점을 고찰할 때(그림 2-17)이 분기점으로 들어가는 전류의 세기들의 총합은 분기점에서 나가는 전류의 세기들의 총합과 같아야 한다. 그렇지 않으면 분기점에 전기량이 쌓이든가 아니면 정상상태보다 계속 모자라게 되면서 이 점의 전위가 변하기때문에 정상전류가 흐를수 없게 된다. 따라서

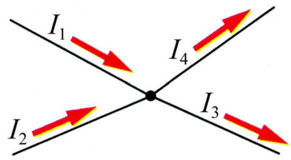


그림 2-17. 키르히호프의 제1법칙

$$I_1+I_2=I_3+I_4$$

이처럼 회로의 분기점으로 들어오는 전류의 세기들의 총합은 여기서 나가는 전류의 세기들의 총합과 같다. 이것을 **키르히호프의 제1법칙**이라고 부른다.

키르히호프의 제2법칙

이 법칙은 분기점이 들어있는 닫긴회로에서 성립하는 법칙이다. 닫긴회로에는 저항뿐아니라 전원들도 있을수 있다.

그림 2-18과 같이 회로에 있는 어느 한 닫긴회로를 고찰하자.

회로에는 전류의 세기와 방향을 미리 임의로 가정하여 표시하여놓았다.

이 닫긴회로를 네개의 부분회로로 갈라볼수 있는데 매 부분회로들에서 회로의 방향을 시계바늘회전방향으로 잡자. 그리고 점 a, b, c, d의 전위들을 각각 φ_a, φ_b φ_c, φ_d라고 하자.

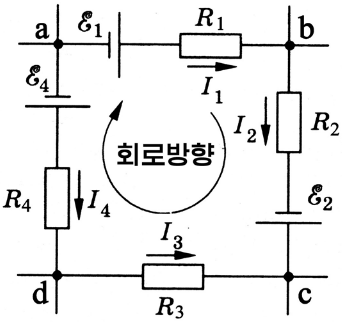


그림 2-18. 키르히호프의 제2법칙

그러면 전원을 포함한 부분회로의 옴의 법칙에 의해 다음식들이 얻어진다.

※ 전류의 방향이 회로방향과 반대로 가정된 부분회로들에서는 전원을 포함한 부분회로의 옴의 법칙에 의해 전류의 세기가 $-I$로 된다.

$$I_1R_1 = \varphi_a - \varphi_b + \mathscr{E}_1$$
$$I_2R_2 = \varphi_b - \varphi_c + \mathscr{E}_2$$
$$-I_3R_3 = \varphi_c - \varphi_d$$
$$-I_4R_4 = \varphi_d - \varphi_a - \mathscr{E}_4$$

이 식들을 모두 합하면 다음과 같이 된다.

$$I_1R_1 + I_2R_2 + (-I_3R_3) + (-I_4R_4) = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 + (-\mathscr{E}_4)$$

이처럼 닫긴회로에서 전압강하들의 대수적합은 닫긴회로에 있는 전동력들의 대수적합과 같다. 이것을 **키르흐호프의 제2법칙**이라고 부른다.

키르흐호프의 법칙은 복잡한 전기회로들에서 전류의 세기나 전압, 전동력 등 여러가지 전기적량들을 계산할 때 필요한 련립방정식을 준다.

그러므로 키르흐호프의 제1, 2법칙을 리용하여 구하려는 전기적량만 한 개수의 련립방정식을 작성하고 이것을 풀어야 한다.

만일 문제를 풀어서 전류의 세기나 전동력의 값이 부의 값으로 구해지면 그것은 전류가 회로에 표시한 방향과 반대방향으로 흐른다든가 전동력이 반대로 놓여있다는 것을 의미한다.

[례제] 그림 2-19에서 매 저항으로 흐르는 전류의 세기들을 구하여라. 전지의 내부저항은 무시한다.

풀이. 주어진것: $\mathscr{E}_1$=16V

$\mathscr{E}_2$=4V

R_1=20Ω

R_2=10Ω

R_3=20Ω

구하는것: I_1?, I_2?, I_3?

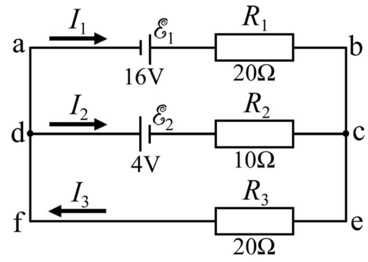


그림 2-19

키르흐호프의 법칙을 적용하기 위하여 매 저항으로 흐르는 전류의 세기를 각각 I_1, I_2, I_3이라고 하고 그 방향을 그림처럼 잡자. 그러면 키르흐호프의 제 1 법칙으로부터 다음식이 성립한다.

$$I_3 = I_1 + I_2 \qquad (1)$$

닫긴회로 abcd와 dcef에 대하여 회로방향을 시계바늘회전방향으로 잡고 키르흐호프의 제2법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$I_1R_1 - I_2R_2 = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 \quad \rightarrow \quad 20I_1 - 10I_2 = 20 \qquad (2)$$

$$I_2R_2 + I_3R_3 = -\mathscr{E}_2 \quad \rightarrow \quad 10I_2 + 20I_3 = -4 \qquad (3)$$

식 1, 2, 3을 련립하여 풀어 I_1, I_2, I_3을 계산하면 I_1=0.7A, I_2=-0.6A, I_3=0.1A가 얻어진다. 이 결과에 의하면 I_2은 우리가 표시한 방향과 반대로 흐른다는 것을 알수 있다.

답. 0.7A, -0.6A, 0.1A

문 제

1. 례제에서 I_1, I_2, I_3의 방향과 회로방향을 자기가 생각하는대로 임의로 취하고 문제를 풀어보아라. 그리고 례제의 답과 비교하여라. 여기서 무엇을 알수 있는가?
2. 그림 2-20에서 $\mathscr{E}_1$=2V, $\mathscr{E}_2$=1V이며 이것들의 내부저항은 모두 r=1Ω이며 부하저항은 R=0.5Ω이다. 회로의 매 가지로 흐르는 전류의 세기들을 구하여라.

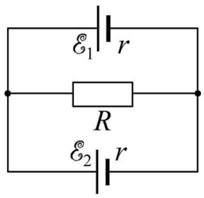


그림 2-20

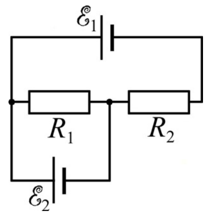


그림 2-21

3. 그림 2-21 에서 $\mathscr{E}_1$=20V, $\mathscr{E}_2$=5V, R_1=50Ω, R_2=30Ω이다. R_1와 R_2에 흐르는 전류의 세기를 구하여라. 전지들의 내부저항은 무시한다.

제 5 절. 여러가지 전기회로

전지의 련결

손전지에서 전지들이 어떻게 련결되여있는가를 보아라. 두개 또는 세개의 전지가 직렬로 련결되였다. 현실에서는 필요에 따라 전지들을 직렬 또는 병렬련결하여 쓴다. 여러개의 전지들이 련결되여 이루어진 전지렬을 **바떼리**라고도 부른다.

전지의 직렬련결. 그림 2-22와 같이 전동력이 $\mathscr{E}$, 내부저항이 r인 꼭같은 전지 n개를 직렬로 이은 다음 이 전지렬에 저항 R를 이었다고 하자.

이 회로에 얼마만한 전류가 흐르겠는가를 키르흐호프의 제 2 법칙으로 구할수 있다.

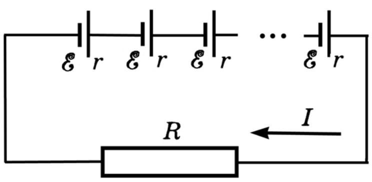


그림 2-22. 전지의 직렬련결

회로의 방향을 시계바늘회전방향으로 잡고 회로에 흐르는 전류의 세기를 I라고 하면 키르흐호프의 제2법칙으로부터

$$IR+Inr=n\mathscr{E}$$

식이 성립한다. 따라서 회로에 흐르는 전류의 세기는

$$I=\frac{n\mathscr{E}}{R+nr}$$

으로 된다. 이 경우 <u>전지렬의 전동력과 내부저항은 n배 커진다.</u>

전지의 병렬련결. 꼭같은 전지 n개를 병렬련결하고 이 전지렬에 저항 R를 이었다고 하자.(그림 2-23)

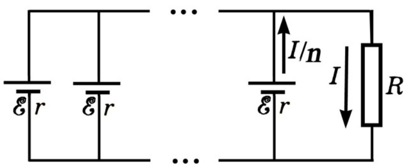


그림 2-23. 전지의 병렬련결

이때 회로전체로 흐르는 전류의 세기를 I라고 하면 한개 전지로는 I/n만 한 전류가 흐른다. 첫번째 전지와 저항 R를 포함하는 닫긴회로를 잡고 회로방향을 시계바늘회전방향으로 잡으면 키르흐호프의 제2법칙에 의해

$$IR+\frac{I}{n}r=\mathscr{E}$$

식이 얻어진다. 이로부터 회로에 흐르는 전류의 세기를 구하면

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R+\frac{r}{n}}$$

이 얻어진다.

이 경우 <u>전지렬의 전동력은 한개 전지의것과 같고 전지렬의 내부저항은 $1/n$ 배로 작아진다.</u>

※ 전동력과 내부저항이 서로 다른 전지들을 직렬련결하였을 때 전지렬의 전체 전동력과 내부저항은 개별적전지들의 전동력과 내부저항의 합과 같다. 그러나 병렬련결한 경우에는 회로에 흐르는 전류의 세기를 키르흐호프의 법칙으로 구해야 한다.



전지들의 내부저항이 외부저항에 비해 대단히 작은 경우 큰 전류를 얻으려면 전지들을 어떻게 련결해야 하겠는가?

휘스톤다리(직류다리)회로

옴의 법칙을 써서 저항을 재려면 전압계와 전류계로써 저항에 걸린 전압과 거기에 흐르는 전류의 세기를 측정해야 한다.

그런데 전기측정계기들은 자체의 내부저항을 가지고있기때문에 저항값을 정확히 잴수 없다.

그러나 휘스톤다리를 쓰면 저항값을 보다 정확히 잴수 있다.

그림 2-24는 휘스톤다리회로이다. 여기서 R_x는 재려는 저항이고 R_1, R_2은 저항값이 정확히 주어진 저항이며 R_3은 가변저항기이다.

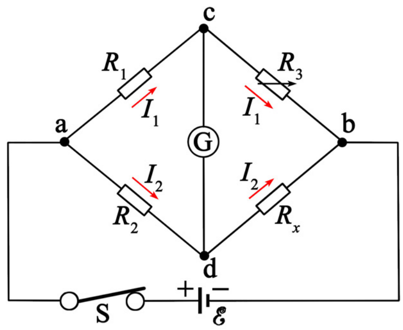


그림 2-24. 휘스톤다리회로

회로에서는 네 저항의 크기에 따라 c→d 또는 d→c 방향의 전류가 존재하여 검류계의 바늘이 왼쪽 또는 오른쪽으로 기울어진다.

이제 R_3을 적당히 조절하여 검류계로 전류가 흐르지 않게 하였다고 하자. 그러면 R_1로 흐르는 전류 I_1는 그대로 R_3으로 흐르고 R_2로 흐르는 전류 I_2은 그대로 R_x로 흐른다. 이때 닫긴회로 acd와 cbd에 대하여 키르흐호프의 제2법칙을 적용하면

$$I_1R_1-I_2R_2=0$$
$$I_1R_3-I_2R_x=0$$

이 얻어진다. 여기서 R_x를 구하면

$$R_x=\frac{R_2}{R_1}R_3$$

이 된다. 이처럼 세개의 저항값을 알면 측정하려는 저항값을 웃식으로부터 구할수 있다.

축전기를 포함한 직류회로

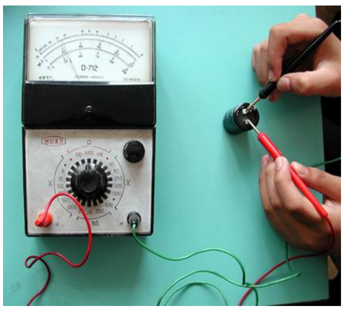
축전기가 포함된 회로에서 전류는 어떤 특성을 가지겠는가.

실험

○ 테스타의 절환기를 저항측정대역을 가리키도록 돌린다.

○ 테스타의 두 봉을 축전기의 량쪽 극판에 대본다.(그림 2-25)

○ 테스타의 바늘이 어떻게 움직이는가를 관찰한다. 이때 테스타의 바늘은 순간적으로 기울어졌다가 다시 제자리로 되돌아온다.


그림 2-25. 테스타에 의한 축전기의 검사

실험에서 무엇을 알수 있는가.

테스타의 절환기를 저항측정대역에 놓으면 그안에 있는 전지와 축전기는 닫긴회로를 이루며 테스타계기는 이 닫긴회로에 흐르는 전류를 나타낸다.

처음순간에는 축전기가 충전되면서 회로에 전류가 흘러 계기바늘이 움직인다. 그러나 축전기극판사이의 전압이 전지의 전동력과 같아지면 충전이 멎으면서 회로에 더는 전류가 흐르지 않으므로 계기의 바늘이 처음자리로 되돌아온다.

※ 우의 실험방법은 테스타를 가지고 축전기의 상태를 알아보는 간단한 검사방법이기도 하다.

이처럼 축전기는 충방전이 진행되지 않는 상태에서는 직류를 통과시키지 않는다.

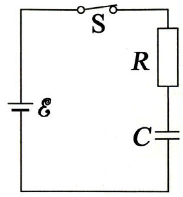


그림 2-26. 축전기와 저항이 직렬련결된 직류회로

전기용량이 C인 축전기와 저항 R를 직렬련결하고 여기에 전원을 련결하자.(그림 2-26)

축전기의 충전이 끝나면 회로에는 전류가 흐르지 않는다. 그러므로 저항 R에서 전압강하는 령이 되고 전원의 전동력은 그대로 축전기에만 걸린다. 이 상태에서 저항은 도선으로서의 역할밖에 수행하지 못한다.

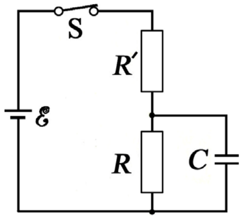


그림 2-27. 축전기와 저항이 병렬련결된 직류회로

다음 축전기와 저항이 병렬련결된 직류회로를 고찰해보자.(그림 2-27) 축전기가 충전되면 축전기로는 전류가 흐르지 않지만 저항을 지나서는 전류가 흐른다.

이때 축전기와 저항 R가 병렬련결되였으므로 축전기에 걸리는 전압은 이 저항에서의 전압강하와 같다.

참고 보상법에 의한 전동력측정

보상법은 표준전지를 리용하여 전동력을 재는 방법이다. 굵기가 일정한 저항선 AB와 전동력이 $\mathscr{E}$인 전지, 전동력이 $\mathscr{E}_0$인 표준전지, 재려는 전지 $\mathscr{E}_x$, 검류계, 스위치 등으로 그림 2-28과 같은 회로를 구성한다. 먼저 스위치 S를 표준전지 $\mathscr{E}_0$의 −단자 a에 련결하고 검류계에 련결된 도선의 다른 끝을 저항선 AB에서 이동시키면서 검류계의 바늘이 움직이지 않는 점 P를 찾고 길이 AP=ℓ_0을 잰다. 다음 스위치 S를 재려는 전지 $\mathscr{E}_x$의 −단자 b에 련결하고 같은 방법으로 점 Q를 찾은 다음 길이 AQ=ℓ_x를 잰다.

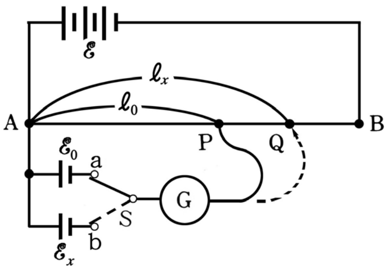


그림 2-28. 보상법에 의한 전동력측정회로

키르흐호프의 법칙을 써서 계산을 하면 이 길이의 비는 두 전지의 전동력의 비와 같게 된다. 따라서

$$\frac{\mathscr{E}_x}{\mathscr{E}_0}=\frac{R_xI}{R_0I}=\frac{\ell_x}{\ell_0} \quad 즉 \quad \mathscr{E}_x=\frac{\ell_x}{\ell_0}=\mathscr{E}_0$$

과 같다. 이처럼 저항선에서 길이를 측정하여 전동력을 잴수 있다.

문 제

1. 그림 2-29에서 $\mathscr{E}$은 내부저항이 2Ω이고 전동력이 24V인 전지이다. 그리고 R_1, R_2, R_3은 각각 10Ω, 5Ω, 7Ω이며 C는 8μF이다.
   ㄱ) 스위치 S를 열어놓았을 때 축전기 량쪽 극판의 전압은 얼마이겠는가?
   ㄴ) 스위치 S를 닫았을 때 저항 R_1에 흐르는 전류의 세기와 축전기 C에 충전되는 전기량을 구하여라.

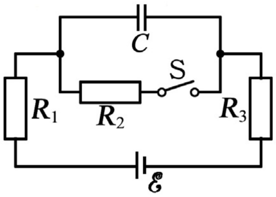


그림 2-29

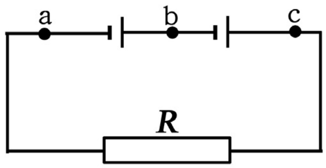


그림 2-30

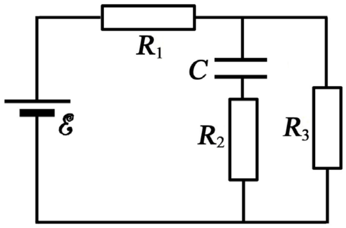


그림 2-31

2. 그림 2-30에서 매 전지의 전동력과 내부저항은 모두 2V, 0.1Ω이고 부하저항 R는 4.8Ω이다. 전위차 $\varphi_a - \varphi_b$를 구하여라.
3. 그림 2-31에서 전지의 전동력은 $\mathscr{E}$=6V이고 내부저항은 령이다. 그리고 R_1=4Ω, R_2=2Ω, R_3=8Ω이고 $C=10^{-6}$F이다. 축전기에 쌓이는 전기량을 구하여라.

제 6 절. 쥴의 법칙

쥴의 법칙

전기다리미, 선풍기, 전등 등이 동작할 때 이것들에서는 어떤 에네르기들이 나오는가를 보아라. 이것들은 무엇에 의하여 여러가지 에네르기를 내는가.

전원과 련결된 부하로 전류가 흐르면 전류는 여기서 일을 수행한다. 이때 수행된 일은 열에네르기, 력학적에네르기, 빛에네르기, 화학적에네르기 등 여러가지 에네르기로 넘어간다.

부하에 걸린 전압이 U, 여기에 흐르는 전류가 I인 때 t시간동안 전류가 한 일은

$$A = IUt$$

로 표시되며 전류가 단위시간동안에 한 일 즉 전력은 다음과 같다.

$$P = IU$$

전열기에서는 력학적인 변화나 화학적인 변화가 없으므로 전류의 일이 모두 열에네르기로 넘어간다. 전열기의 저항을 R라고 하면 $U = IR$이므로 여기서 나오는 열량은 다음과 같다.

$$Q = I^2Rt \quad \text{쥴의 법칙}$$

이처럼 저항에서 나오는 열량은 전류의 세기의 두제곱과 저항, 전류가 흐른 시간을 곱한것과 같다. 이것을 **줄의 법칙**이라고 부른다.

이 법칙은 1840년에 영국의 물리학자 쥴이 실험적으로 발견하였다. 전류가 흐를 때 저항에서 생기는 열을 **쥴열**이라고 부른다.

저항들이 직렬로 련결되였을 때는 매 저항들로 흐르는 전류의 세기가 같다. 따라서 웃식으로부터 저항값이 큰 저항에서 더 많은 열이 나온다는것을 알수 있다.

전열기에서는 가열선인 니크롬선과 련결도선인 동선이 직렬련결되여있다. 그러므로 저항이 큰 니크롬선에서는 많은 열량이 나오지만 저항이 작은 련결도선은 알릴듯말듯 한 작은 열을 낸다.

전기선들을 련결한 부위에서 접촉이 잘 안된 경우 이 부위의 저항이 전기선보다 대단히 크다. 그러므로 쥴열이 발생하여 빨갛게 단다.

쥴의 법칙은 부하에 걸어준 전압에 의하여 표시할수도 있다. $I=U/R$ 이므로 이때 쥴의 법칙은 다음과 같다.

$$Q=\frac{U^2}{R}t$$

병렬련결된 저항들에서는 매 저항들에 걸린 전압이 갈기때문에 웃식으로부터 저항값이 작은 저항들에서 더 많은 열이 나온다는것을 알수 있다.

쥴의 법칙은 저항 R를 가진 도체로 전류가 흐를 때는 반드시 열이 생긴다는것을 보여준다.

전동기나 전등 같은데서도 전기저항 R가 존재하므로 력학적에네르기 또는 빛에네르기와 함께 쥴열이 생겨 이것들을 가열시킨다.



가정에서 리용하는 전기다리미와 전기담요중에서 어느것의 저항이 더 크겠는가?

전원의 출력

닫긴회로에서 전류가 하는 일을 살펴보자.

전원은 내부저항을 가지고있다. 그러므로 닫긴회로에 전류가 흐를 때에는 전원내부에서도 쓸데없는 쥴열이 발생한다.

때문에 전원이 내는 전력은 모두 외부회로에서 소비되지 못하고 전원내부에서도 소비된다. 닫긴회로의 옴의 법칙에 의해 식

$$\mathcal{E}=IR+Ir$$

가 성립한다. 이 식의 량변에 전류의 세기 I를 곱하면

$$I\mathcal{E}=I^2R+I^2r=IU+I^2r$$

가 얻어진다. 여기서 $I\mathscr{E}$ 은 전원이 내는 전체 전력이고 I^2r 는 전원내부에서 줄열로 소비되는 전력이다. 그리고 IU 는 부하에서 소비되는 전력 즉 전원이 밖에 내는 전력인데 이것을 **전원의 출력**이라고 부른다.

전원의 출력은 그가 내는 전체 전력보다 내부회로에서 소비되는 전력을 던것만큼 작다. 즉

$$P_{출}=IU=I\mathscr{E}-I^2r$$

전원의 출력은 전류의 세기 다시말하여 부하의 저항값에 따라 변한다.

회로가 열렸을 때는 $I=0$ 이므로 $P_{출}=0$ 이다.

회로가 단락되였을 때는 $I=\mathscr{E}/r$ 이므로 $P_{출}=0$ 이다.

외부저항과 내부저항이 같을 때에는 $I=\dfrac{\mathscr{E}}{2r}$ 이므로 $P_{출}=\dfrac{\mathscr{E}^2}{4r}$ 으로서 최대로 된다.(그림 2-32)

그림에서 보다싶이 전원의 출력은 부하의 저항이 전원의 내부저항과 같을 때 가장 크다. 이 경우에 전원과 부하가 **정합**되였다고 말한다. 정합상태는 전원이 부하에서 최대출력을 내는 상태이다.

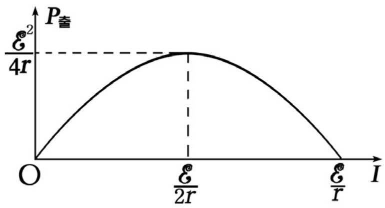


그림 2-32. 전류의 세기와 전원의 출력사이의 관계

[례제] 그림 2-33에는 정격값이《220V, 60W》인 전등들을 켜기 위한 회로가 그려져있다. 입구전압은 220V이고 입구에서 전등까지 간 송전선의 저항은 두 선이 다 $r=1\Omega$이다. 전등 10개를 결 때 전등들에서 소비되는 전력과 송전선에서의 전압강하 및 여기에서 생기는 전력의 도중손실을 구하여라.

풀이. 주어진것: $U_0=220\text{V}$

$U=220\text{V}$

$P_0=60\text{W}$

$r=1\Omega$

$n=10$

구하는것: $P?$, $U'?$, $P'?$

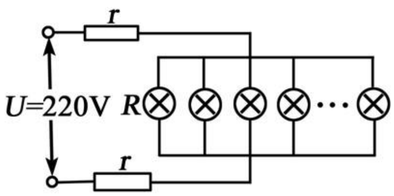


그림 2-33

전등의 저항은

$$R=\frac{U_0^2}{P_0}=\frac{220^2}{60}=\frac{4\,840}{6}\ (\Omega)$$

이므로 회로로 흐르는 전류의 세기는

$$I=\frac{U}{\dfrac{R}{n}+2r}=\frac{220}{\dfrac{4\,840}{6\times10}+2\times1}\approx2.66(\text{A})$$

이다. 그리고 송전선에서의 전압강하는

$$U'=I\cdot2r=2.66\times2\times1=5.32(\text{V})$$

이고 도중손실되는 전력은

$$P'=I^2\cdot 2r=2.66^2\times 2\times 1\approx 14.15\,(\mathrm{W})$$

로 된다. 전등들에서 소비되는 전력은 다음과 같다.

$$P=\frac{(U-U')^2}{\frac{R}{n}}=\frac{(220-5.32)^2}{\frac{4\,840}{6\times 10}}\approx 571.3\,(\mathrm{W})$$

답. 약 571.3W, 약 5.32V, 약 14.15W

참고 **발전소에서는 왜 송전전압을 높이는가**

전기를 생산하는 발전소들은 전기를 쓰는 곳으로부터 멀리 떨어져있다. 그런데 먼 거리에 전기를 보내자면 그만한 송전선이 있어야 하고 여기에 전류가 흐르면 쓸데없는 쥴열이 많이 생기게 된다. 이렇게 소비되는 전력은 흐르는 전류가 클수록 많아진다. 전력의 이러한 도중손실을 줄이자면 전류를 될수록 작게 해야 한다.

전력의 값은 전압과 전류의 세기를 곱한것과 같기때문에 주어진 전력을 송전하는 조건에서 전류를 작게 하자면 전압을 높여주어야 한다. 그런데 전력의 도중손실은 전압의 두제곱에 거꿀비례하여 작아진다. 때문에 발전기에서 생산되는 전압이 수천~수만V인 전력을 수만~수십만V로 높여서 송전한다.

전기를 쓰는 소비지에는 이렇게 높은 전압으로 송전되여온 전력을 공장과 가정들에서 쓸수 있게 380V나 220V로 낮추는 변전소들이 있다.

이처럼 발전소에서는 전력의 도중손실을 줄이기 위해 전압을 높여서 전기를 보내준다.

문 제

1. 600W짜리 전열기를 리용하여 1L의 물을 10℃로부터 100℃까지 가열하는데 몇min 걸리겠는가? 발생하는 열량의 절반을 잃어버렸다고 본다.
2. 그림 2-34의 단자 A, B사이에 전원을 넣고 이로부터 저항이 각각 0.1Ω인 전기줄 AC, BD를 늘인 다음 단자 C, D사이에서 1kW의 전력을 소비하도록 한다.

   ㄱ) 단자 C, D사이의 전압이 100V라고 할 때 전기줄에서 쥴열로 소비되는 전력은 얼마이고 단자 A, B사이에는 몇V의 전압을 걸어주어야 하는가?

   ㄴ) 단자 C, D사이의 전압을 n배 크게 하면 전기줄에서 잃어버리는 전력은 몇배로 되겠는가?

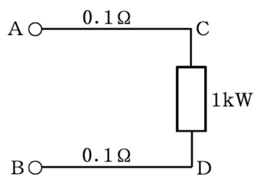


그림 2-34

3. 그림 2-35에서 전지의 전동력은 $\mathscr{E}$=9V, 내부저항은 r = 0.1Ω이다. 그리고 $R_1=R_2$, $R_3=R_4$ =1Ω이며 전등 A와 B의 정격값은 각각《6V, 6W》,《8V, 16W》이다. 만일 전등 A를 정격전압에서 동작하게 하려면 R_1는 얼마여야 하며 이때 전등 B에서 소비되는 전력은 얼마인가?

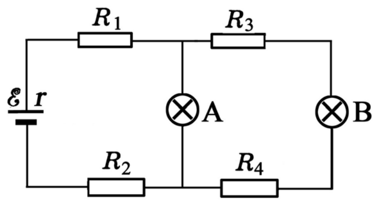


그림 2-35

탐구

문제: 부분회로의 옴의 법칙을 리용하여 닫긴회로의 옴의 법칙을 유도하여라.

방향: · 닫긴회로를 량쪽에 U 의 전압이 걸린 부분회로로 고쳐 그려보아라.

· 부분회로의 옴의 법칙으로부터 닫긴회로의 옴의 법칙을 유도하여보아라.

복습문제

1. 은의 밀도는 10.5×10^3 kg/m³ 이고 1mol의 질량은 108g이다. 한개의 은원자가 하나의 자유전자를 내는것으로 보고 은속의 자유전자수밀도를 구하여라.

(답. 약 5.83×10^{28} m^{-3})

2. 자름면적이 1mm²인 은도선에 0.1A의 전류가 흐른다. 이 은도선속에서 자유전자의 평균속도를 구하여라. (답. 1.07×10^{-5} m/s)

3. 전지에 전등을 련결하는데 한쪽은 동선, 다른쪽은 알루미니움선을 썼다. 두 도선의 굵기는 같다. 두 도선에서 전도전자의 평균속도비를 구하여라. 알루미니움의 전도전자수밀도는 $n_{알}=6\times10^{28}$ m^{-3}로 보아라. (답. $v_{동}/v_{알}=0.7$)

4. 그림 2-36에서 꼭같은 전등 A, B, C는 모두 켜있다. 이제 가변저항기의 미끄럼단자 P를 아래로 내리면 전등의 밝기가 어떻게 변하겠는가? 아래의 표현에서 정확한 답을 선택하여라. 전지의 내부저항은 무시한다. 처음 P는 가변저항기의 가운데점에 있었다.

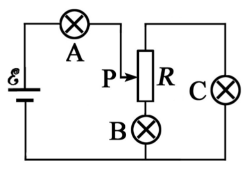


그림 2-36

ㄱ) 전등 A, B, C가 모두 밝아진다.

ㄴ) 전등 A, B는 밝아지고 전등 C는 어두워진다.

ㄷ) 전등 A, C는 밝아지고 전등 B는 어두워진다.

ㄹ) 전등 A는 밝아지고 전등 B, C는 어두워진다.

5. 그림 2-37에서 전지의 내부저항은 무시한다. 가변저항기 R의 미끄럼단자를 a에서 b로 이동시킬 때 R'량단의 전압은 어떻게 변하겠는가? 아래의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

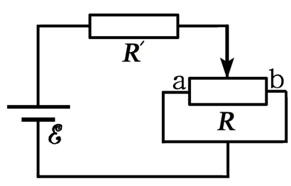


그림 2-37

ㄱ) 계속 커진다.

ㄴ) 처음 커지다가 다시 작아진다.

ㄷ) 계속 작아진다.

ㄹ) 처음 감소하다가 다시 커진다.

6. 아래문장의 □안에 알맞는 수자와 글을 써넣어라. 그림 2-38에서 전류계들의 내부저항은 무시하며 AB사이의 전압은 U=36V이다. 그리고 R_1=R_2=R_3=12Ω이며 가변저항기의 총저항도 12Ω이다. 가변저항기의 미끄럼단자 P가 b에 있을 때 전류계 A_1는 □A를 가리키고 A_2은 □A를 가리키며 A_3은 □A를 가리킨다. 그리고 P를 b에서 a로 이동시킬 때 전류계 A_1가 가리키는 값은 □지고 A_2이 가리키는 값은 □며 A_3이 가리키는 값도 □다.

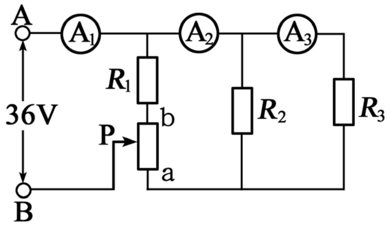


그림 2-38

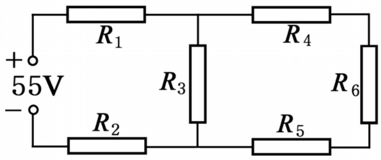


그림 2-39

7. 그림 2-39의 회로에서 모든 저항은 다같이 2Ω이다. 매 저항에서 전압과 전류의 세기를 구하여라.

(답. U_1=U_2=20V, I_1=I_2=10A, U_3=15V, I_3=7.5A, U_4=U_5=U_6=5V, I_4=I_5=I_6=2.5A)

8. 직경이 D인 사기원통에 콘스탄탄선을 n번 빽빽이 감아서 만든 가변저항기가 있다. 저항기의 길이는 x 이고 총저항은 R 이다. 콘스탄탄의 비저항을 표시하는 식을 구하여라.

(답. $\rho=\dfrac{x^2}{4n^3D}R$)

9. 자름면적이 0.2cm^{2}이고 길이가 15cm인 철선의 량끝에 어떤 전압을 걸었을 때 1A의 전류가 흘렀다. 자름면적이 0.05cm^2, 길이가 30cm인 철선에 같은 전압을 걸면 얼마의 전류가 흐르겠는가? (답. 0.125A)

10. 전자석의 권선(동선)의 저항이 20℃에서 2Ω이고 전류가 흘러서 전자석이 동작한 후에는 2.4Ω으로 커졌다. 권선은 몇℃까지 가열되겠는가?

(답. 75.3℃)

11. 저항온도결수가 각각 α_1, α_2인 두 도체의 저항은 0℃ 때 R_{01}, R_{02}이다. 이 두 도체를 직렬련결하면 그의 저항온도결수는 어떻게 표시되겠는가?

$\left(\text{답. } \dfrac{R_{01}\alpha_1 + R_{02}\alpha_2}{R_{01} + R_{02}}\right)$

12. 손전지의 건전지는 전동력이 1.5V이고 단락전류는 1A이다.

ㄱ) 건전지의 내부저항은 얼마인가?

ㄴ) 이 건전지에 1Ω의 저항을 이었을 때 단자전압은 얼마인가?

(답. ㄱ) 1.5Ω ㄴ) 0.6V)

13. 저항이 2Ω인 도체를 전동력이 1.1V인 전지에 이었을 때 0.5A의 전류가 흐른다. 이 전지의 단락전류는 얼마인가?

(답. 5.5A)

14. 그림 2-40에서 전류계의 내부저항은 무시하고 전압계의 내부저항은 무한대로 본다. 그런데 어느 저항이 끊어져 전류계는 0.8A, 전압계는 3.2V를 가리켰다. $\mathscr{E}=4$V이라는것만을 알고있다.

ㄱ) 어느 저항이 끊어졌겠는가?

ㄴ) 전지의 내부저항은 얼마인가?

(답. ㄱ) R_1가 끊어짐 ㄴ) $r=1\Omega$)

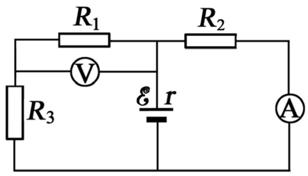


그림 2-40

15. 그림 2-41에서 전원의 전동력은 $\mathscr{E}=6.3$V, 내부저항은 $r=0.5\Omega$, $R_1=2\Omega$, $R_2=3\Omega$이며 가변저항기의 전체 저항은 $R_3=5\Omega$이다. 가변저항기의 미끄럼단자를 옮길 때 전원으로 흐르게 되는 전류의 범위를 구하여라.

(답. 2.1~3A)

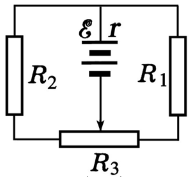


그림 2-41

16. 그림 2-42에서 $\mathscr{E}_1=2$V, $r_1=0.5\Omega$, $\mathscr{E}_2=4$V, $r_2=1\Omega$, $R_1=10\Omega$, $R_2=5\Omega$, $R_3=2\Omega$이다.

ㄱ) R_1, R_2, R_3에 흐르는 전류의 세기와 방향을 지적하여라.

ㄴ) 점 a에 대한 점 b의 전위를 구하여라.

(답. ㄱ) R_1: 왼쪽으로 0.22A, R_2: 왼쪽으로 0.3A, R_3: 왼쪽으로 0.08A ㄴ) -1.5V)

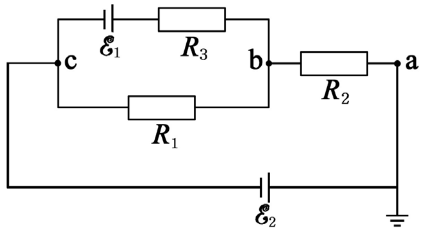


그림 2-42

17. 병렬로 이은 두 전지렬을 가변저항기에 이었다.(그림 2-43) 가변저항기에 흐르는 전류의 세기를 구하여라. $\mathscr{E}_1=8$V, $r_1=1\Omega$, $\mathscr{E}_2=4$V, $r_2=0.5\Omega$이고 가변저항기의 총저항은 10Ω인데 미끄럼단자는 가운데에 놓여있다.

(답. 1A)

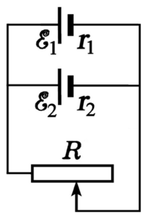


그림 2-43

18. 그림 2-44에서 AB는 직경이 0.4mm인 고르로운 니크롬선이다. AC의 길이가 62.8cm인 때 전류계는 0.2A를 가리켰고 검류계는 령을 가리켰다. 니크롬선의 비저항은 1.09×10^{-6} Ω·m이다. 전지들의 내부저항은 무시한다.

ㄱ) AC사이의 저항을 구하여라.

ㄴ) $\mathscr{E}_1$의 전동력을 구하여라.

(답. ㄱ) 5.45Ω ㄴ) 1.09V)

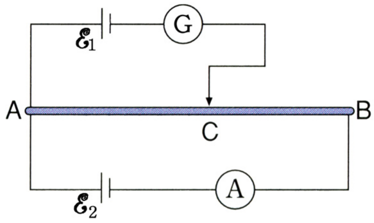


그림 2-44

19. 그림 2-45에서 $\mathscr{E}_0$, $\mathscr{E}$의 내부저항과 전류계의 내부저항은 령이다. $\mathscr{E}$을 그림처럼 련결하면 전류계는 령을 가리킨다.

ㄱ) $\mathscr{E}$의 전동력은 얼마인가?

ㄴ) C_0에는 얼마만한 전기량이 쌓여있겠는가?

ㄷ) $\mathscr{E}$을 반대로 련결하면 전류계로 전류가 흐른다. 이때 전류는 K→L 또는 L→K중에서 어느 방향으로 흐르겠는가?

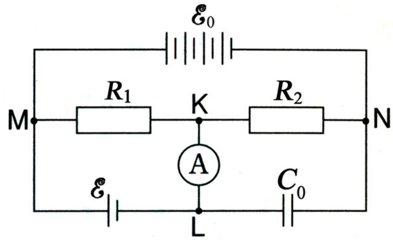


그림 2-45

(답. ㄱ) $\frac{R_1}{R_1+R_2}\mathscr{E}_0$, ㄴ) $\frac{\mathscr{E}_0 C_0 R_2}{R_1+R_2}$, ㄷ) L→K)

20. 전동력이 2V이고 내부저항이 0.04Ω인 꼭같은 축전지 6개를 직렬로 련결한 바떼리에 3.6Ω인 외부회로가 련결되였다. 회로의 전류의 세기와 단자전압을 구하여라. (답. 3.125A, 11.25V)

21. 내부저항이 10Ω이고 전동력이 15V인 전지 4개를 병렬로 련결하였다. 이것을 저항이 2Ω인 저항체에 련결하였을 때와 저항이 100Ω인 저항체에 련결하였을 때의 전류의 세기를 구하여라. (답. 약 3.3A, 약 0.15A)

22. 그림 2-46에서 전원의 전동력은 $\mathscr{E}$=4V(내부저항 무시)이고 $R_1=R_2=R$이며 $C_1=C_2$이다. 아래의 문장들가운데서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 스위치 K를 연 상태에서는 $U_{ab}=0$이고 축전기들은 충전되여있지 않다.

ㄴ) 스위치 K를 연 상태에서는 $U_{ab}=1$V이고 축전기들은 충전되여있지 않다.

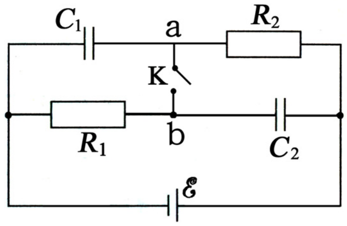


그림 2-46

ㄷ) 스위치 K를 닫으면 $U_{ab}=0$이 되고 축전기들의 전기량은 감소한다.

ㄹ) 스위치 K를 닫으면 $U_{ab}=0$이 되고 축전기들의 전기량은 증가한다.

23. 전동력이 $\mathscr{E}$, 내부저항이 r인 두개의 꼭같은 전지와 $R=r$인 부하가 있다. 두 전지를 직렬련결하고 부하에 전력을 공급할 때 흐르는 전류의 세기는 I_1, 전지렬의 단자전압은 U_1이고 병렬련결하고 공급할 때에는 각각 I_2, U_2이다. 다음의 비교에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $U_1 > U_2$, $I_1 > I_2$　　ㄷ) $U_1 < U_2$, $I_1 < I_2$

ㄴ) $U_1 = U_2$, $I_1 = I_2$　　ㄹ) $U_1 > U_2$, $I_1 = I_2$

24. 그림 2-47과 같은 《검은 함》에는 꼭같은 세개의 전지들로만 구성된 회로가 있다. 네개의 단자들에 대하여 측정한 전동력값은 다음과 같다.

$U_{AC}=0$, $U_{AB}=U_{BD}=U_{CB}=1.5$V, $U_{AD}=U_{CD}=3$V

함안에는 전지들이 어떻게 련결된 회로가 있겠는가?

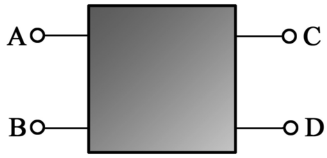


그림 2-47

25. 저항 A, B, C, D를 병렬련결하고 이것들의 $U-I$ 그라프를 그리면 그림 2-48과 같다. 어느 저항의 소비전력이 제일 크겠는가?

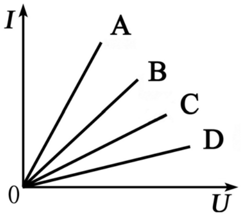


그림 2-48

26. 그림 2-49에서 전원의 전동력은 $\mathcal{E}$, 내부저항은 r, 부하들의 저항은 $R_1=R_2=r$ 이다. 저항 R_1, R_2, r 에서 소비되는 전력의 비 $P_1:P_2:P_3$은 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 1:1:1　　　　ㄷ) 4:4:1

ㄴ) 1:1:2　　　　ㄹ) 1:1:4

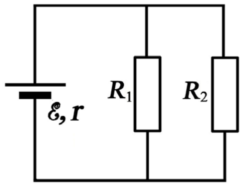


그림 2-49

27. 정격값이 《100Ω, 4W》, 《12.5Ω, 8W》, 《9Ω, 100W》인 세개의 저항이 있다. 이 저항들을 직렬련결하고 걸어주어야 할 최대전압과 병렬련결한 회로에 흘러야 할 최대전류의 세기를 구하여라. 정격전압이상 전압을 걸거나 정격전류이상 전류가 흐르면 저항이 못쓰게 된다고 보아라.

(답. 24.3V, 2.01A)

28. 그림 2-50에서 전원의 전동력은 $\mathcal{E}$이고 내부저항은 r 이다. 고정저항은 $R_0=r$ 이며 가변저항은 $R_1=2r$ 이다. 만일 가변저항기의 미끄럼단자를 A에서 B로 이동시킬 때 아래의 표현에서 정확한것들을 선택하여라.

ㄱ) 전원의 출력은 커진다.

ㄴ) 가변저항기에서 소비되는 전력은 커진다.

ㄷ) 전원내부저항에서의 전압강하는 커진다.

ㄹ) 전원의 전체 전력은 커진다.

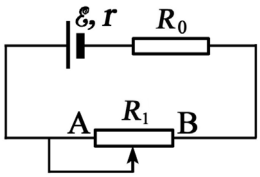
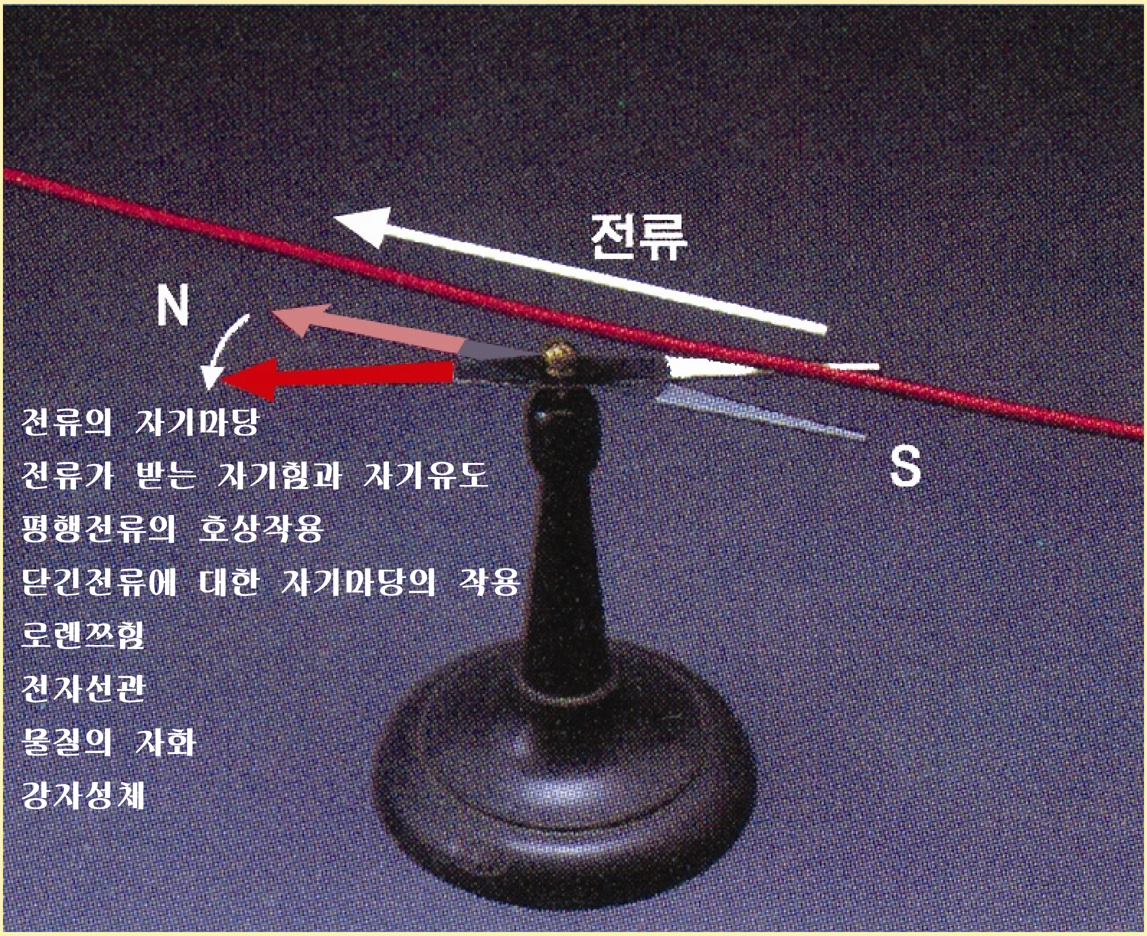


그림 2-50

제 3 장. 자기마당

전기적현상과 마찬가지로 자기적현상은 우리의 생활과 밀접히 련관되여있다. 전동기나 발전기, TV, 콤퓨터, 전화기를 비롯한 전기기구나 장치들에서는 자기적현상들이 널리 쓰이고있다.

이 장에서는 자기마당과 그속에서 전류가 흐르는 도선 및 전하의 운동, 자성체에 대한 지식을 학습하게 된다.



제 1 절. 전류의 자기마당

자기힘과 자기마당

두 막대기자석을 가까이 놓으면 같은 극끼리는 서로 밀고 다른 극끼리는 서로 끌어당긴다.(그림 3-1)

그러면 자석들은 무엇을 통하여 서로 힘을 주고받는가.

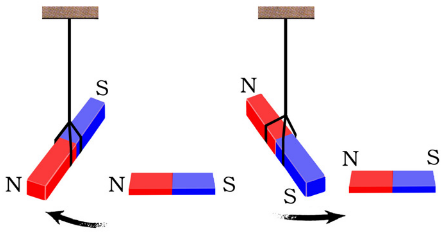


그림 3-1. 자석들의 호상작용

자석들은 서로 떨어져서 힘을 주고받으므로 자석들사이의 공간에는 힘을 전달하는 어떤 물질이 있어야 한다.

자석과 자석, 자석과 전류, 전류와 전류사이의 호상작용을 **자기힘**이라고 부르며 자기힘을 전달하는 공간을 **자기마당**이라고 부른다.

자석들은 항상 주위에 자기마당을 만들며 이것을 통하여 자기힘을 주고받는다.

자기마당도 전기마당처럼 눈에 보이지 않는다.

그러나 자기마당속에 놓인 자석이나 지북침들이 받는 힘을 통하여 자기의 존재를 나타낸다.

지북침이 북남방향을 가리키는것은 우리가 살고있는 지구주위에 자기마당이 있다는것을 보여준다.

자기마당의 방향은 자기마당속에 놓인 지북침의 N극이 가리키는 방향으로 정한다.

그리고 매 점에서 접선방향이 자기마당의 방향과 일치하는 곡선을 **자력선**이라고 부른다.

그러므로 자기마당속에 놓인 지북침은 자력선의 접선방향으로 정돈된다.(그림 3-2)

그림에서 보다싶이 자석에서는 자력선이 뻗어나가는쪽을 N극으로, 들어오는쪽을 S극으로 정한다.

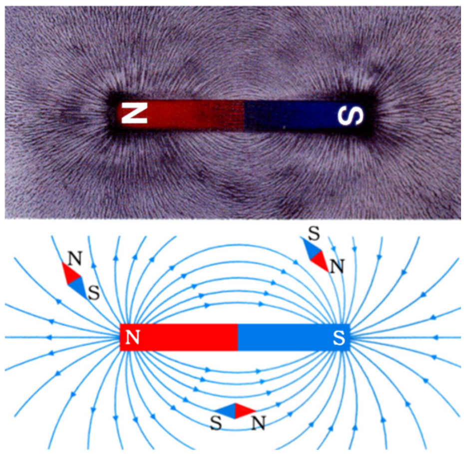


그림 3-2. 막대기자석의 자력선

전류의 자기마당

1820년에 물리학자 에르스테드(1777-1851)는 다음과 같은 실험을 하였다.

실험

○ 실험탁우에 지북침이 북남방향을 가리키도록 라침판을 놓는다. 그리고 라침판우에 지북침의 방향으로 직선도선을 설치한다.(그림 3-3)

○ 도선에 전류를 통과시키면서 지북침이 어떻게 기울어지는가를 관찰한다.

○ 도선에 반대방향으로 전류를 통과시키면서 지북침이 기울어지는것을 관찰한다.

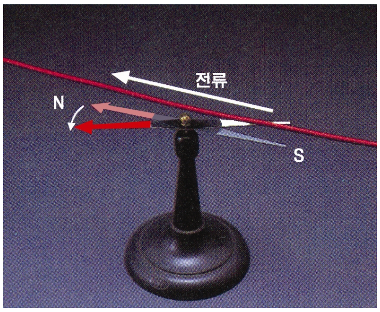


그림 3-3. 에르스테드의 실험

실험에서 무엇을 알수 있는가.

도선에 전류가 흐르면 지북침이 기울어진다. 이것은 지북침이 자석뿐아니라 전류에 의해서도 자기힘을 받는다는것을 보여준다. 이것은 또한 전류가 둘레에 자기마당을 만든다는것을 보여준다.

이처럼 전류가 흐르는 도선은 주위에 자기마당을 만든다.

도선들에 전류가 흐를 때 자기마당의 자력선분포모양을 살펴보자.

직선도선이 수직으로 지나간 유기유리판우에 철가루를 골고루 뿌린다. 그리고 도선에 전류를 통과시키면서 유기유리판을 여러번 두드린다. 그러면 철가루들은 직선전류가 만드는 자기마당에 의해서 자력선을 따라 배렬된다.(그림 3-4)

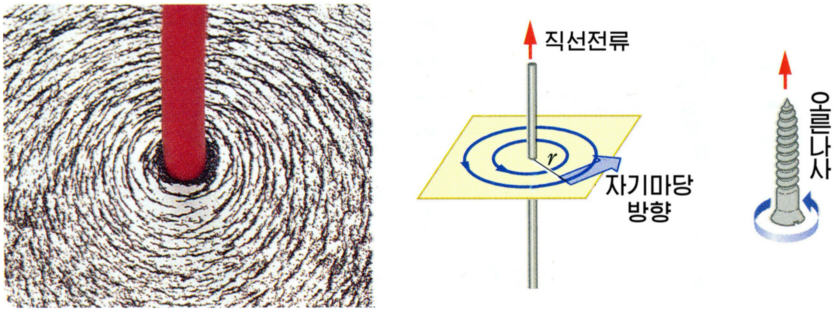


그림 3-4. 직선전류의 자력선

그림에서 알수 있는것처럼 직선전류가 만드는 자기마당의 자력선은 전류를 중심으로 하고 그에 수직인 면우에 놓이는 동심원들을 이루며 닫긴다.

이 동심원들은 전류가까이에서는 조밀하고 점차 멀어지면서 성글게 분포된다.

직선전류가 만드는 자기마당의 방향은 전류의 방향으로 오른나사가 전진하도록 나사를 돌릴 때 나사머리가 도는 방향이다.

직선전류가 만드는 자기마당에 대해서는 극을 말할수 없다.

같은 방법으로 원형도선에 흐르는 전류가 만드는 자기마당의 자력선분포를 얻어보면 그림 3-5와 같다.

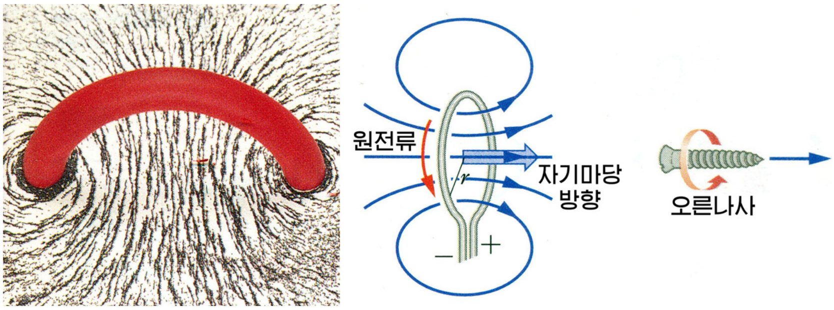


그림 3-5. 원전류의 자력선

그림에서 보는것처럼 원전류의 중심에서 자기마당은 전류면에 수직이며 원전류의 방향으로 오른나사를 돌릴 때 나사의 전진방향이 바로 중심에서의 자기마당방향이다.

그림에서 보면 원전류는 자력선이 나가는쪽 면이 N극으로 되고 들어오는쪽 면이 S극으로 되는 원판모양의 납작한 자석과 같은 자기마당을 만든다.

같은 방법으로 전류가 흐르는 선륜이 만드는 자력선을 얻어내면 그림 3-6과 같다.

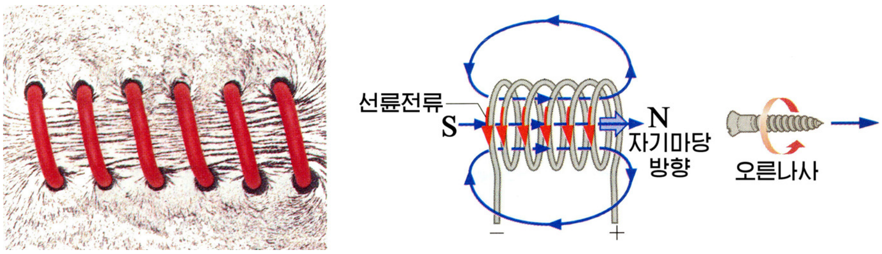


그림 3-6. 선륜전류의 자력선

선륜전류가 만드는 자기마당의 자력선은 선륜내부에서는 분포가 균일한 평행선들을 이룬다. 이것은 선륜내부에는 고른자기마당이 생긴다는것을 보여준다.

선륜밖에서는 자력선들이 성글게 분포되면서 닫긴다.

선륜내부에서의 자기마당의 방향은 역시 선륜전류방향으로 오른나사를 돌릴 때 나사의 전진방향이 선륜내부에서의 자기마당방향이다.

선륜전류가 만드는 자기마당의 자력선은 막대기자석이 만드는 자력선과 비슷한 모양을 가진다. 그러므로 선륜전류에 대해서도 N극과 S극을 지적할수 있다.

생각하기 자력선의 모양은 전력선과 어떻게 다른가?

문 제

1. 금속도선에는 많은 자유전자들이 있어도 주위에 자기마당을 만들지 못한다. 그러나 도선에 전류가 흐르면 자기마당이 생긴다. 이것은 무엇을 의미하는가?

2. 에르스테드의 실험에서는 왜 라침판을 도선옆에 놓지 않고 도선우나 아래에 놓아야 하는가를 설명하여라.
3. 지구자기마당의 원인을 설명하는 어떤 리론에 의하면 지구의 동쪽에서 서쪽으로 큰 원전류가 흐르고있다고 본다. 지구의 자력선을 그려보고 N극과 S극을 정하여라.

일화 전기와 자기의 련관해명

단마르크의 물리학자 에르스테드는 어느날 바다에서 벼락을 맞은 배에 있던 지북침의 하나가 웬일인지 서쪽을 가리키고있었다는 흥미있는 사실에 접하게 되였다.

여기서 그는 번개나 벼락이 전기현상이라면 그것이 자성을 띤 지북침에 어떤 작용을 준것이 아닌가라고 생각하였다.

이 수수께끼를 풀려고 사색과 실험을 계속하던 그는 1820년 어느날 강의를 하려고 대학에 가던 도중 갑자기 새로운 착상을 하였다.

(마찰전기는 자석에 아무런 작용도 주지 않는다. 그러면 전류는 어떤 작용을 주지 않겠는가?)

에르스테드는 흥분을 누르고 강의실에 들어갔다. 대학생들은 책을 펼쳐놓았으나 그는 강의안이 아니라 볼타전지와 지북침을 교탁우에 올려놓고 실험을 해보았다.

우선 볼타전지에 전기줄을 이은 다음 그가까이에 지북침을 놓았다. 그런데 북남을 가리켜야 할 지북침이 전기줄에 수직되는 방향으로 돌아가는것이였다.

에르스테드는 그것이 전기가 내는 열에 의한것이 아니겠는가 하는 생각이 떠올라 그 사이에 두터운 종이를 끼우고 실험을 반복하였으나 결과는 같았다.

이번에는 전지의 극을 바꾸어보았더니 지북침의 방향은 반대로 향하는것이였다.

이렇게 되여 그처럼 찾던 전기와 자기사이의 련관에 대한 비밀을 찾은 그는 강의할것도 잊고 교단에서 미소를 짓고 서있었다.

그리하여 전류주위에 자기마당이 생긴다는것이 밝혀지고 자기적현상이 전류와 밀접한 관계가 있다는것을 찾아냈다.



제 2 절. 전류가 받는 자기힘과 자기유도

전류는 주위에 자기마당을 만들며 자기마당속에서 힘을 받게 된다. 그러면 자기마당속에서 전류가 받는 자기힘의 크기와 방향이 어떠하겠는가.

전류가 받는 자기힘

전류가 흐르는 도선의 어떤 토막(전류토막)이 받는 자기힘을 살펴보자.

실험

○ 말굽자석의 두 극사이에서 전류토막이 움직일수 있도록 설치한다.(그림 3-7)
○ 전류토막에 흐르는 전류의 방향을 변화시키면서 자기힘의 방향을 관찰한다.
○ 전류토막과 자기마당의 방향을 서로 다르게 하면서 자기힘을 관찰한다.
○ 자기마당속에 놓이는 전류토막의 길이와 전류의 세기를 변화시키면서 자기힘을 관찰한다.

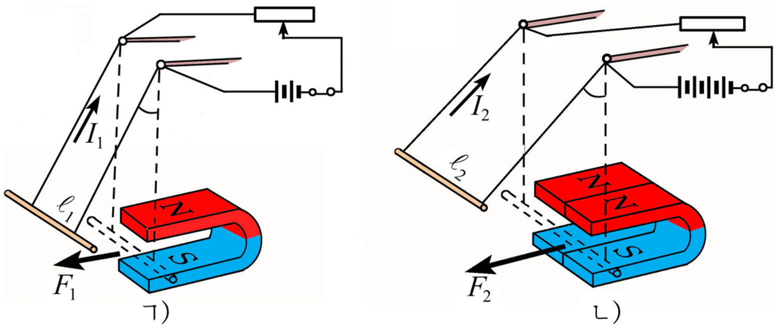


그림 3-7. 전류토막이 받는 자기힘

실험에서 무엇을 알수 있는가.

전류토막이 받는 자기힘의 방향은 항상 전류의 방향에 수직이면서도 자기마당의 방향에도 수직이다. 이때 자기힘의 방향은 다음과 같이 결정된다.

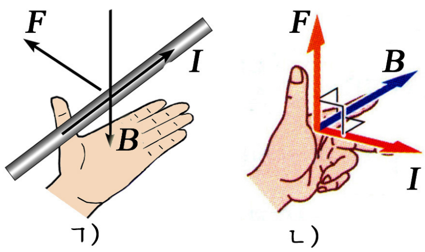


그림 3-8. 왼손의 규칙

<u>왼손바닥으로 자력선이 들어가게 하고 네손가락으로 전류의 방향을 가리킬 때 그에 수직으로 편 엄지손가락이 자기힘의 방향을 가리킨다.</u>(그림 3-8의 ㄱ) 이것을 **왼손의 규칙**이라고 부른다.

왼손의 규칙은 왼손의 세손가락을 펴고 리용할수도 있다.(그림 3-8의 ㄴ)

둘째손가락으로 자기마당의 방향을 가리키고 셋째손가락으로 전류의 방향을 가리킬 때 이것들에 수직으로 편 엄지손가락은 전류토막이 받는 힘의 방향을 가리킨다.

실험에 의하면 전류토막이 받는 자기힘의 크기는 전류의 세기와 전류토막의 길이에 비례하며 또한 전류토막과 자기마당이 이루는 각의 시누스에도 비례한다.

$$F = BI\ell \sin\alpha \qquad \text{전류토막이 받는 자기힘}$$

여기서 B는 비례결수이다.

전류가 받는 자기힘의 크기는 전류가 자기마당에 수직으로 놓일 때 최대로 되며 평행으로 놓일 때 령으로 된다.

※ 자기마당속에서 전류토막이 받는 자기힘은 다음과 같은 벡토르적으로도 표시할수 있다.

$$\vec{F} = I\left[\vec{\ell}, \vec{B}\right]$$

여기서 $\vec{F}$ 는 전류토막이 받는 힘벡토르이며 $\vec{\ell}$ 은 크기가 전류토막의 길이와 같고 방향이 전류방향으로 향하는 벡토르이다.

이때 힘 $\vec{F}$ 의 크기는 $F = IB\ell\sin\alpha$ 이며 방향은 $\vec{\ell}$ 과 $\vec{B}$ 가 이루는 평면내에서 $\vec{\ell}$ 에서 $\vec{B}$ 로 오른나사를 돌릴 때 나사의 전진방향으로 향한다.

자기유도

전기마당은 전기마당의 세기 $\vec{E}$ 에 의하여 세기와 방향이 표시된다.

자기마당의 세기와 방향은 어떤 량으로 표시되겠는가.

전류토막이 자기마당에 수직으로 놓일 때 받는 자기힘의 크기는 다음과 같다.

$$F = BI\ell$$

여기서 비례결수 B는 전류토막이 놓여있는 곳에서 자기마당에만 관계되는 량으로서 B가 클수록 자기마당은 전류토막에 더 큰 힘을 준다.

그러므로 B를 가지고 자기마당을 평가할수 있다. 전류토막이 받는 자기힘의 크기를 표시하는 식에 들어있는 비례결수 B를 **자기유도**라고 부른다.

전류토막이 자기마당에 수직으로 놓일 때 자기유도는 다음과 같이 표시된다.

$$B = \frac{F}{I\ell} \qquad \text{자기유도}$$

<u>자기유도는 자기마당에 수직으로 놓인 단위전류가 흐르는 단위길이의 전류토막이 받는 자기힘의 크기와 같은 량이다</u>. <u>자기유도 B는 자기마당의 주어진 점에서의 자기마당방향으로 향하는 벡토르량이다</u>.

이처럼 자기유도 $\vec{B}$ 에 의해 자기마당이 센가 약한가 그리고 어느쪽으로 향하는가를 표시할수 있다.

자기유도의 단위는 1T(**레슬라**)이다. 1T는 자기마당에 수직으로 놓인 길이가 1m이고 1A의 전류가 흐르는 전류토막이 받는 자기힘의 크기가 1N인 자기마당의 자기유도값이다.

실험실에서 흔히 쓰는 영구자석의 두 극가까이에서의 자기유도는 0.5T정도이며 지구의 북극과 남극지방에서 지구자기마당의 자기유도는 5×10^{-5} T정도이다.

전류가 만드는 자기마당의 자기유도

정밀한 실험과 구체적인 계산에 의하여 얻어진 결과를 가지고 몇가지 전류들이 만드는 자기마당의 자기유도를 고찰해보자.

전류 I가 흐르는 직선전류로부터 그에 수직으로 r만큼 떨어진 곳에서의 자기유도는 다음과 같이 표시된다.

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} \qquad \text{직선전류의 자기유도}$$

여기서 μ_0은 **자기상수**라고 부르는 상수로서 그의 크기는 다음과 같다.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \mathrm{N/A^2}$$

이처럼 직선전류의 자기유도는 전류의 세기에는 비례하고 거리에는 거꿀비례한다.

한편 반경이 r이고 전류 I가 흐르는 원전류의 중심에서의 자기유도는 다음과 같이 표시된다.

$$B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I}{r} \qquad \text{원전류의 중심에서의 자기유도}$$

원전류의 중심에서 자기유도는 전류의 세기에는 비례하고 원전류의 반경에는 거꿀비례한다.

길이가 L이고 권회수가 N인 선륜에 I의 전류가 흐를 때 선륜내부에서 자기유도는 다음과 같이 표시된다.

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 nI \qquad \text{선륜내부에서의 자기유도}$$

선륜내부에서 자기유도는 전류의 세기가 클수록, 단위길이당 권회수가 많을수록(빽빽이 감을수록) 크다.

이상에서 보는것처럼 여러가지 전류가 만드는 자기마당의 자기유도는 모두 전류의 세기에 비례한다.

문제

1. 그림 3-9에서 두 용수철사이간격은 10cm이다. 두 용수철은 종류가 같은것이며 용수철사이에만 B=0.5T인 고른자기마당이 있다. 도선 AB가 받는 중력이 0.1N일 때 용수철이 늘어나지 않도록 하려면 도선에 얼마만한 전류를 어느 방향으로 흘려보내야 하겠는가? 자기마당은 종이면을 수직으로 뚫고 들어간다.

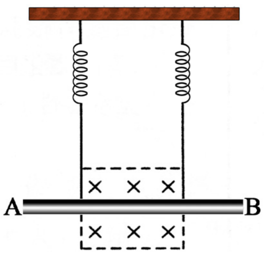


그림 3-9

2. 그림 3-10에서처럼 반경이 10cm인 원형도선에 1A의 전류가 시계바늘방향으로 흐른다. 이제 원전류의 중심으로부터 20cm 떨어진 곳에 긴 직선도선을 원전류가 놓이는 면에 놓았다. 원전류의 중심에서 자기마당을 령으로 만들려면 얼마만한 전류를 어느 방향으로 직선도선에 흘려보내야 하겠는가?

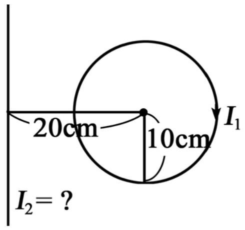


그림 3-10

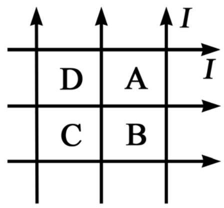


그림 3-11

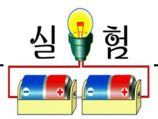
3. 그림 3-11과 같이 6개의 직선도선에 화살표방향으로 동일한 전류가 흐른다. 도선들사이의 간격은 일정하며 한 평면내에 놓여있다. 구역 A, B, C, D에는 자기마당이 령으로 되는 점들이 있다. 이 점은 어느 구역에 있겠는가?

제 3 절. 평행전류의 호상작용

전류가 흐르는 도선들은 주위에 자기마당을 만든다. 그러므로 자기마당의 호상작용으로 하여 전류도선들끼리도 서로 힘을 주고받는다.

평행전류의 호상작용

평행전류들이 호상작용하는 힘이 어떤 법칙에 따르는가를 알아보자.



○ 그림 3-12의 ㄱ와 같이 두개의 긴 전기줄(금속박막띠)을 나란히 늘여놓고 전지에 직렬로 이으면 서로 민다.

○ 그림 3-12의 ㄴ와 같이 두개의 전기줄을 전지에 병렬로 이으면 서로 당긴다.

○ 전류의 세기를 변화시키면서 전기줄들의 호상작용을 알아본다.

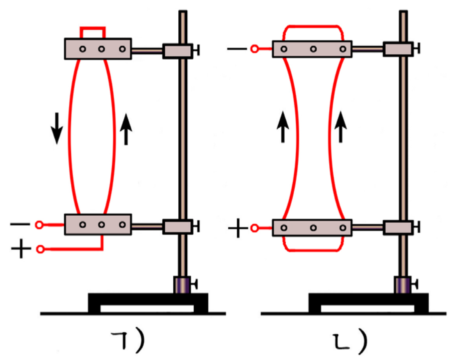


그림 3-12. 평행전류의 호상작용

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

첫째로, 방향이 같은 평행전류는 서로 당기고 반대인 평행전류는 서로 민다.

둘째로, 전기줄에 흐르는 전류의 세기가 클수록 호상작용힘은 커진다.

그러면 두 평행전류의 호상작용힘의 크기는 어떻게 표시되겠는가.

그림 3-13의 ㄱ와 같이 같은 방향으로 흐르는 두개의 평행직선전류 I_1, I_2가 r만큼 떨어져있다고 하자.

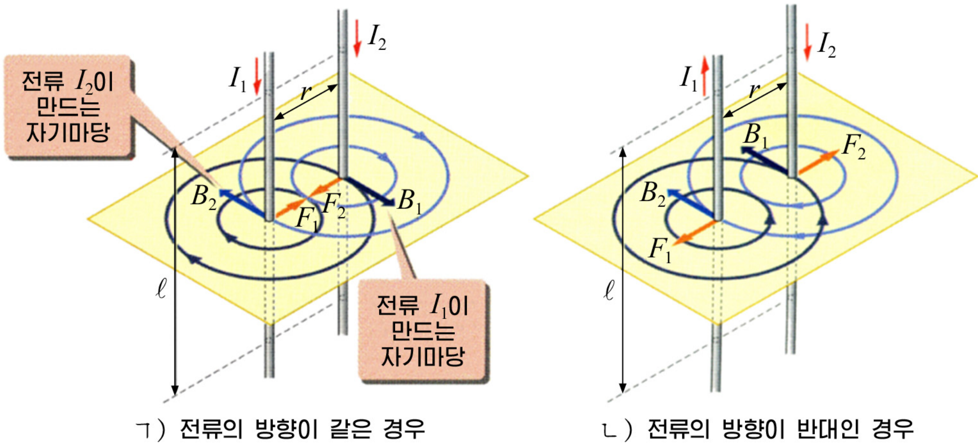


그림 3-13. 두 평행전류의 호상작용

먼저 전류 I_1가 받는 힘을 고찰하자. 이를 위해서는 전류 I_2이 I_1가 있는 위치에 만드는 자기유도의 크기와 방향을 따져야 한다.

직선전류의 자기유도공식에 의해 I_2이 만드는 자기유도는

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{r}$$

로 된다. 그리고 B_2의 방향은 I_1에 수직이다.

따라서 전류 I_1에서 길이가 ℓ만 한 어떤 전류토막이 받는 자기힘의 크기는

$$F_1 = B_2 I_1 \ell = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{r} I_1 \ell$$

로 된다. 그리고 F_1의 방향은 I_2에 끌리우는쪽으로 향한다.

같은 방법으로 전류 I_2에서 길이 ℓ만 한 전류토막이 전류 I_1가 만드는 자기마당에 의해 받는 자기힘을 구할수 있다.

$$F_2 = B_1 I_2 \ell = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r} I_2 \ell$$

F_2의 방향역시 I_1에 끌리우는쪽으로 향한다.

이처럼 같은 방향으로 흐르는 두 직선전류는 서로 끈다.

그리고 F_1와 F_2의 크기는 꼭같다. 그것은 뉴톤의 제3법칙에 의해 두 힘이 작용과 반작용으로 되기때문이다.

I_1와 I_2의 방향이 반대인 때도 힘의 크기는 우와 같이 표시되며 방향만이 반대로 된다.

두 평행전류의 호상작용힘을 하나로 표시하면

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{r} \ell \qquad \text{평행전류의 호상작용힘}$$

이처럼 두 평행전류에서 전류토막들이 호상작용하는 자기힘의 크기는 두 전류의 세기들의 적과 도선토막의 길이에 비례하고 그들사이거리에 거꿀비례한다. 힘의 방향은 전류의 방향이 같을 때에는 끌힘으로, 반대일 때는 밀힘으로 나타난다.

전류의 세기단위

국제단위계에서 전류의 세기단위 1A는 기본단위의 하나이다. 이 단위는 두 평행전류의 호상작용에 관한 법칙으로부터 결정되였다.

1A의 전류가 흐르면서 서로 1m 떨어진 두 평행전류에서 1m 길이의 도선토막들사이에 호상작용하는 힘의 크기를 구해보자.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I^2}{r} \ell = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{1^2}{1} \cdot 1 = 2 \times 10^{-7} (\mathrm{N})$$

이처럼 진공속에서 서로 1m 떨어진 무한히 긴 두 평행도선에 같은 크기의 전류가 흐르는 경우 도선의 1m 길이에 작용하는 자기힘의 크기가 2×10^{-7}N일 때 도선들로 흐르는 전류의 세기가 1A이다.

그러므로 1C은 1A의 전류가 흐르는 도선의 어떤 자름면을 1s동안에 지나는 전기량이다.

문 제

1. 두 평행전류에서 전류의 방향이 반대일 때 성립하는 호상작용법칙을 유도해보아라.
2. 두개의 긴 직선도선이 《+》자모양을 띠고 서로 가까이 놓여있다. 도선들에 전류가 흐를 때 이것들은 어떻게 움직이겠는가?
3. 각각 10A의 전류가 같은 방향으로 흐르는 세 직선도선이 5cm의 간격을 두고 평행으로 놓여있다. 다음과 같은 경우에 매 도선 10cm가 받는 자기힘을 구하여라.
   ㄱ) 세 도선이 한 평면내에 있을 때
   ㄴ) 세 도선이 3각기둥의 모서리들에 있을 때

제 4 절. 닫긴전류에 대한 자기마당의 작용

전동기들에서는 전류가 흐르는 닫긴도선들이 자기마당의 작용을 받아서 회전자를 돌려준다. 그리고 전류계나 전압계에서도 이와 같은 작용으로 바늘이 기울어진다.

그러면 닫긴전류는 자기마당속에서 어떤 작용을 받겠는가.

자기모멘트

닫긴전류가 자기마당속에서 받는 작용은 전류의 세기, 닫긴전류가 둘러싸는 면적 그리고 닫긴전류가 놓여있는 상태에 따라 달라진다.

? 닫긴전류의 이러한 특성을 하나의 량으로써 표시할수 없겠는가.

이를 위하여 벡토르량인 자기모멘트를 끌어들인다.

자기모멘트는 크기가 전류의 세기에 닫긴전류의 면적을 곱한것과 같고 전류의 방향으로 오른나사를 돌릴 때 나사의 전진방향으로 향하는 벡토르량이다.(그림 3-14)

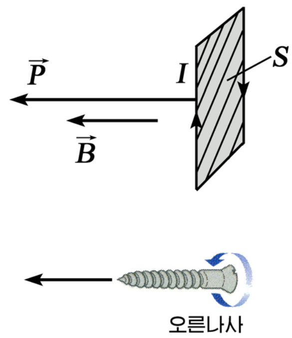


그림 3-14. 자기모멘트의 방향

자기모멘트를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\vec{P} = IS\vec{n} \qquad \text{자기모멘트벡토르}$$

여기서 $\vec{n}$은 $\vec{P}$방향으로 향하는 단위벡토르이다. 따라서 벡토르 $\vec{n}$이 어느 방향으로 향하는가에 따라 닫긴전류가 놓이는 상태가 결정된다.

자기모멘트를 이와 같이 끌어들이면 원전류를 비롯한 닫긴전류의 중심에서 자기마당의 방향이 자기모멘트의 방향과 일치하게 된다.

닫긴전류에 대한 자기마당의 작용

4각형모양의 닫긴전류가 고른자기마당속에서 받는 작용을 살펴보자.

먼저 그림 3-15와 같이 전류 I가 흐르는 닫긴전류의 전류면이 자력선들과 평행으로($\vec{P}$ 와 $\vec{B}$가 수직이다.) 놓여있다고 하자.

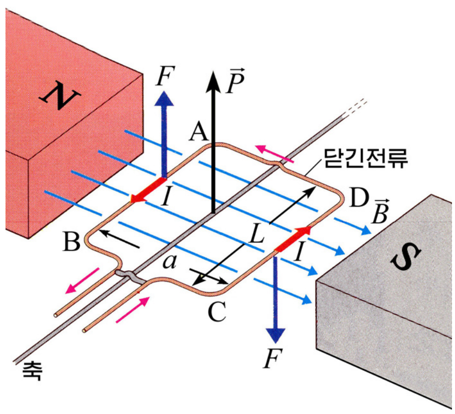


그림 3-15. 전류면이 자력선과 평행일 때 닫긴전류에 대한 자기마당의 작용

닫긴전류의 BC부분과 DA부분에서 전류의 방향은 자기마당과 일치하므로 아무런 자기힘도 받지 않는다.

그러나 길이가 L인 AB부분은 우로 향하는 자기힘을 받고 CD부분은 아래로 향하는 자기힘을 받는다. 이 두 힘의 크기는 모두

$$F = BIL$$

이고 방향이 반대이므로 닫긴전류에 대하여 짝힘으로 된다.

이처럼 닫긴전류는 자기마당속에서 짝힘모멘트를 받아 돌아간다.

그리고 돌아가는 방향은 $\vec{P}$와 $\vec{B}$가 이루는 각이 작아지는 방향이다.

닫긴전류에 작용하는 짝힘모멘트는

$$M = Fa = IBLa = IBS$$

로 된다. 여기서 $S=La$는 닫긴전류면의 면적이다.

$P=IS$이므로 짝힘모멘트는

$$M=PB$$

로 표시된다.

다음은 닫긴전류의 전류면이 자력선들과 평행이 아닐 때($\vec{P}$와 $\vec{B}$가 어떤 각 θ를 이루고있을 때) 닫긴전류에 작용하는 힘을 따져보자.(그림 3-16)

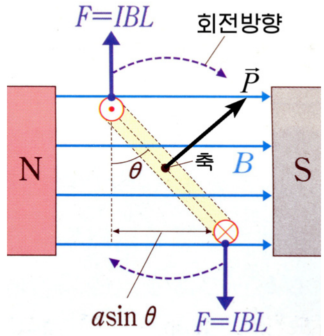


그림 3-16. 전류면이 자력선과 평행이 아닐 때 닫긴전류에 대한 자기마당의 작용

이때에도 도선의 AB부분과 CD부분은 짝힘을 받는데 팔의 길이가 달라진다.

팔의 길이는 $a\sin\theta$이므로 짝힘모멘트는 다음과 같이 표시된다.

$M = PB\sin\theta$ **닫긴전류가 받는 짝힘모멘트**

이 식으로부터 알수 있는것처럼 $\vec{P}$와 $\vec{B}$가 수직일 때보다 짝힘모멘트가 작다.

그러므로 닫긴전류가 자기마당속에서 받게 되는 짝힘모멘트의 최대값은 PB와 같다.

※ 자기마당속에서 닫긴전류가 받는 짝힘모멘트는 다음과 같이 벡토르적으로도 표시할 수 있다.

$$\vec{M} = [\vec{P},\ \vec{B}]$$

이때 짝힘모멘트의 크기는 $M = PB\sin\theta$이며 방향은 $\vec{P}$ 와 $\vec{B}$가 이루는 평면내에서 $\vec{P}$에서 $\vec{B}$로 오른나사를 돌릴 때 나사의 전진방향으로 향한다.

$\vec{P}$와 $\vec{B}$가 이루는 각이 령인 때 즉 닫긴전류면이 자기마당에 수직으로 놓일 때는 짝힘모멘트가 령이 된다.

이때 닫긴전류는 자기마당으로부터 아무런 작용도 받지 않는다.

그러나 자기마당속에서 닫긴전류도선이 짝힘을 받아 회전할 때에는 관성에 의해 이 상태가 순간적으로 지나게 된다.

그러면 닫긴전류를 반대방향으로 돌려주는 짝힘이 생긴다. 이때 전류의 방향을 바꾸어주면 닫긴도선이 계속 한 방향으로만 돌아간다.

이것이 **직류전동기의 원리**이다.

해보기

소형직류전동기(놀이감용, 전기면도기용 등)를 분해하여 그의 구조를 그린 다음 동작원리를 설명하여보아라.

전류계의 원리

자기마당속에서 닫긴전류가 받는 작용은 전류계에 리용된다.(그림 3-17)

영구자석과 철심사이의 틈에서 자력선은 철심에 의하여 원의 직경방향으로 향한다. 그러므로 가동선륜은 어느 상태에 놓이든 그 면이 언제나 자력선들과 평행으로 놓이게 된다.(그림 3-18) 따라서 가동선륜이 받는 짝힘모멘트는 틀이 놓이는 상태에 관계없이 일정하며 항상 최대로 된다.

가동선륜에 측정하려는 전류가 흐르면 그것은 자기힘의 짝힘모멘트와 라선용수철의 꼬임힘모멘트와 비길 때까지 회전한다. 이때 가동선륜에 붙어있는 계기바늘이 기울어진다. 눈금판에는 바늘이 기울어지는 각에 비례하는 전류의 세기값들이 적혀있으므로 계기바늘은 측정하려는 전류의 세기값을 가리킨다.

이와 같은 구조를 가진 측정계기를 **자석전기식계기**라고 부른다.

전압계의 구조도 전류계와 비슷한데 다만 그의 내부저항만을 크게 하였다.

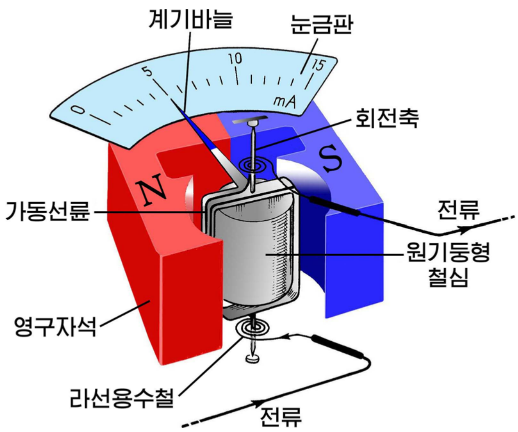


그림 3-17. 전류계의 구조

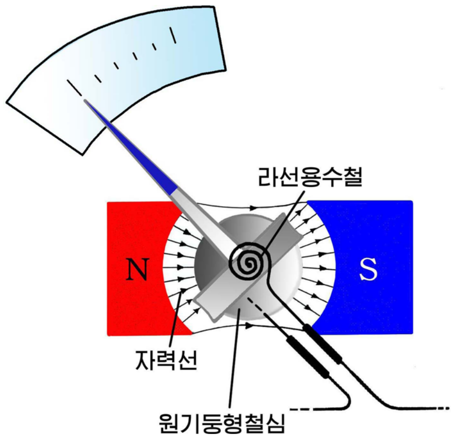


그림 3-18. 전류계에서의 자력선분포

자석전기식계기로는 직류의 세기와 직류전압만을 잴수 있다. 교류전류와 교류전압을 재기 위해서는 교류를 직류로 바꾸는 보조장치를 계기에 설치해야 한다.

문 제

1. 바른4각형도선으로 전류가 흐를 때 그의 중심에서 자기마당의 방향과 자기모멘트의 방향을 결정하여보아라.

2. 그림 3-19에서 $\overset{\frown}{KN}$과 $\overset{\frown}{LM}$을 동심활등으로 하는 부채형의 닫긴전류도선에 I_1 의 전류가 흐른다. 이 부채형의 닫긴전류면에 수직이면서 그 중심을 지나는 직선도선에 전류 I_2 이 흐른다. 이때 닫긴전류면은 어떻게 운동하겠는가? 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

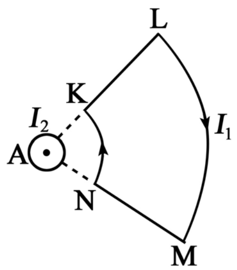


그림 3-19

ㄱ) 왼쪽으로 움직인다.

ㄴ) 오른쪽으로 움직인다.

ㄷ) A점을 축으로 하여 진동한다.

ㄹ) KL이 종이면우로 향하고 MN이 종이면아래로 향하는 회전운동을 한다.

3. 그림 3-20과 같은 직4각형의 닫긴전류회로에서 a=3cm, b=5cm이고 전류의 세기는 I=10A이다. B=0.1T의 고른자기마당속에서 닫긴전류의 자기모멘트 $\vec{P}$와 자기마당 $\vec{B}$ 사이의 각이 α=30°일 때 닫긴전류회로에 작용하는 짝힘모멘트를 구하여라.

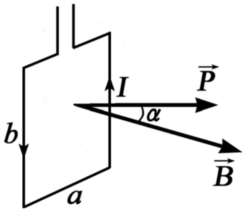


그림 3-20

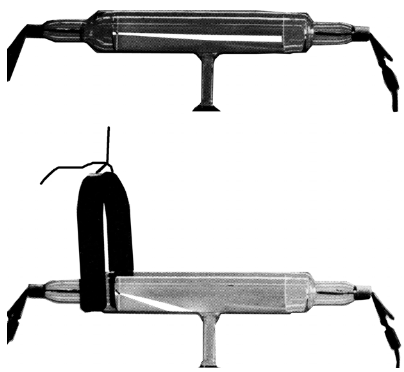
제 5 절. 로렌쯔힘

로렌쯔힘

자기마당속에 놓인 도선으로 일단 전류가 흐르면 그것은 자기힘을 받아 움직인다. 그런데 전류는 도선속에 있는 자유전자들의 흐름이다. 그렇다면 혹시 도선속에서 운동하는 전자들이 힘을 받아서 도선전체가 움직이지 않겠는가.

이것은 간단한 실험으로 알아볼수 있다.

한줄기로 지나가는 전자들의 가까이에 자석을 가까이 가져갈수록 곧추 나가던 전자들의 흐름이 점점 기울어진다.(그림 3-21)


그림 3-21. 음극선의 편기

이것은 운동하는 전자들이 자기마당속에서 힘을 받는다는것을 보여준다. 전자뿐아니라 전기띤 알갱이들은 자기마당속에서 운동하면 역시 자기힘을 받는다.

이와 같이 자기마당속에서 운동하는 전기띤 알갱이가 받는 자기힘을 **로렌쯔힘**이라고 부른다.

멎어있는 전하는 전기힘만을 받지만 운동하는 전하는 전기힘과 함께 자기힘도 받는다.

전류의 방향은 양전하의 이동방향이므로 양전하가 받는 로렌쯔힘의 방향도 왼손의 규칙으로 정해진다.

왼손바닥으로 자기마당이 들어가게 하고 네손가락으로 양전하의 운동방향을 가리킬 때 그에 수직으로 편 엄지손가락이 로렌쯔힘의 방향을 가리킨다.(그림 3-22의 ㄱ)

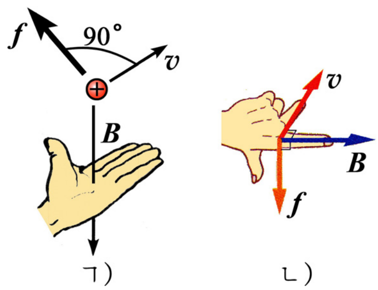


그림 3-22. 로렌쯔힘의 방향

음전하의 운동방향은 전류의 방향과 반대이다. 그러므로 음전하가 받는 로렌쯔힘의 방향은 양전하가 받는 힘의 방향과 반대이다.

이처럼 로렌쯔힘의 방향은 전하의 운동방향에 수직이면서 자기마당에도 수직이다.

※ 로렌쯔힘의 방향을 규정하는 왼손의 규칙은 왼손의 세손가락을 펴고 리용할수도 있다.(그림 3-22의 ㄴ) 둘째손가락으로 자기마당을 가리키고 셋째손가락으로 전하의 운동방향을 가리킬 때 이것들에 수직으로 편 엄지손가락은 전하가 받는 로렌쯔힘의 방향을 가리킨다.

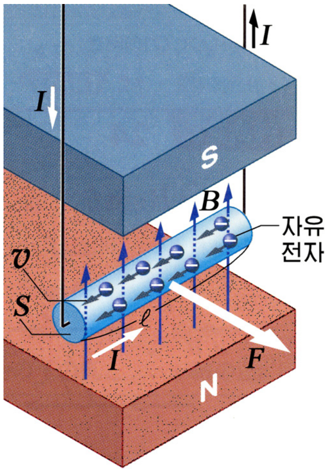


그림 3-23. 로렌쯔힘의 계산

로렌쯔힘의 크기

전류토막이 자기힘을 받는것은 그속에서 운동하는 전자들이 로렌쯔힘을 받은 결과이다.

❓ 그렇다면 전류토막이 받는 자기힘으로부터 로렌쯔힘을 구할수 없겠는가.

그림 3-23과 같이 고른자기마당 B에 수직으로 놓인 길이가 ℓ이고 자름면적이 S인 도선토막을 생각하자.

여기에 흐르는 전류의 세기를 I, 자유전자수밀도를 n, 전자의 이동속도를 v라고 하면

$$I = nevS$$

로 된다. 그러므로 자기힘의 크기는

$$F = IB\ell = nevSB\ell$$

로 된다. 이 힘은 도선토막안의 전체 전자들이 받는 힘이므로 한개 전자가 받는 로렌쯔힘을 구하려면 이것을 전체 전자수 $N = nS\ell$로 나누어야 한다. 즉

$$f = \frac{F}{N} = \frac{nevSB\ell}{nS\ell} = evB$$

자기마당방향과 α의 각을 이룬 전류토막이 받는 자기힘은 $IB\ell\sin\alpha$로 표시된다. 그러므로 전기량이 q인 전하가 자기마당방향에 대하여 α의 각으로 운동할 때 받는 로렌쯔힘의 크기는 다음과 같다.

$$f = qvB\sin\alpha \quad \textbf{로렌쯔힘}$$

<u>로렌쯔힘의 크기는 전하가 자기마당방향에 수직으로 운동할 때 최대로 되며 자기마당방향으로 운동할 때에는 령으로 된다.</u>

※ 자기마당속에서 운동하는 전하가 받는 로렌쯔힘은 다음과 같은 벡토르적으로도 표시할수 있다.

$$\vec{f} = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

이때 힘 $\vec{f}$의 크기는 $f = qvB\sin\alpha$이며 방향은 $\vec{v}$와 $\vec{B}$가 이루는 평면내에서 $\vec{v}$에서 $\vec{B}$로 오른나사를 돌릴 때 나사의 전진방향으로 향한다.

고른자기마당속에서 전하의 운동

로렌쯔힘을 받는 전하는 어떤 운동을 하겠는가.

먼저 전기량이 q, 질량이 m인 전하가 v의 속도로 자기마당에 수직으로 날아드는 경우를 보자.

자기마당속에서 전하는 항상 운동방향에 수직인 로렌쯔힘 $f=qvB$를 받는다.

로렌쯔힘은 운동속도의 크기를 변화시키지 못하므로 결국 전하는 등속원운동을 하게 된다.(그림 3-24)

이때 로렌쯔힘은 향심력의 역할을 한다. 그러므로

$$qvB=\frac{mv^2}{R}$$

여기서 R는 원운동자리길의 반경이다.

이 식으로부터 원운동자리길의 반경은

$$R=\frac{mv}{qB} \quad \text{원운동반경}$$

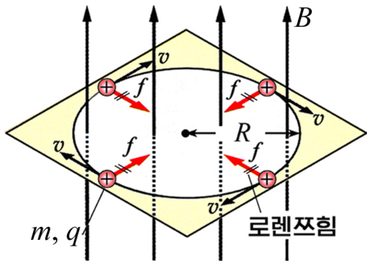


그림 3-24. 자기마당속에서 전하의 원운동

이고 원운동주기는

$$T=\frac{2\pi R}{v}=\frac{2\pi m}{qB} \quad \text{원운동주기}$$

이다. 이처럼 고른자기마당속에서 전하의 원운동자리길반경은 전하가 날아든 속도에 비례한다. 그러나 전하가 한바퀴 도는데 걸린 시간은 날아든 속도에 관계없다.

다음에는 전하가 자기마당에 대하여 어떤 각 θ를 이루고 날아드는 경우를 보자.

이때 전하의 속도를 자기마당에 수직인 성분 $v_\perp=v\sin\theta$와 평행인 성분 $v_{/\!/}=v\cos\theta$로 분해하여 고찰하면 편리하다.(그림 3-25)

속도의 수직성분에 의해 전하는 자기마당에 수직인 면내에서 등속원운동을 한다.

그러나 속도의 평행성분에 의해서는 아무런 힘도 받지 않으므로 자기마당방향으로 등속직선운동을 하게 된다.

결국 전하는 이 두 운동의 합성에 의해 라선운동을 하게 된다.

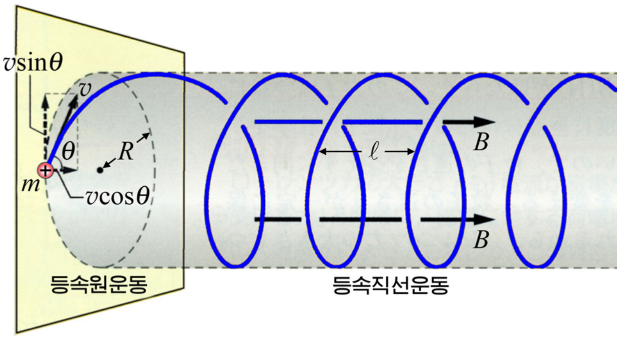


그림 3-25. 전하의 라선운동

우리의 생활에서 흔히 보게 되는 TV수상관, 콤퓨터의 영상표시장치들에서뿐아니라 싸이클로트론, 질량분석기, 전자현미경 등 과학기술수단들에서도 전하가 받는 로렌쯔힘을 기묘하게 리용하고있다.

자료 싸이클로트론

싸이클로트론은 무거운 대전립자들을 높은 속도로 가속시키는 장치이다. 싸이클로트론은 자기마당속에서 전하의 원운동주기가 운동속도에 무관계하다는 원리에 기초하여 제작되였다.

싸이클로트론은 고른자기마당에 수직으로 놓인 반원형의 두 전극 D_1, D_2로 되여있다.(그림 3-26) 여기에 주기적으로 부호가 바뀌는 높은 전압을 걸어주어 전극들사이의 공간에 센 전기마당을 만들어준다.

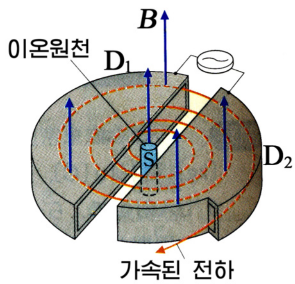


그림 3-26. 싸이클로트론

전극들사이의 중심에는 이온원천 S가 놓여있는데 여기서 대전립자가 튀여나온다.

대전립자가 전기마당에 의해 처음 D_1전극으로 끌려왔다고 하자.

이 대전립자는 전극 D_1안에서 로렌쯔힘을 받아 반원운동을 하고 D_1전극에서 나오면 전기마당에 의해 다시 가속되면서 좀 더 큰 속도로 D_2전극에 입사한다.

D_2전극안에서도 대전립자는 반원운동을 하는데 이때 걸리는 시간은 D_1전극에서와 같다. 그러므로 D_2전극에서 나오는 순간에 전극들에 걸어준 전압의 부호가 바뀌여 대전립자는 다시한번 가속되여 D_1전극으로 다시 들어간다.

이와 같은 운동이 반복되면서 대전립자의 원운동자리길반경은 계속 커지며 그의 속도도 커지게 된다.

대전립자의 속도가 대단히 커졌을 때 그것을 싸이클로트론의 창구로 뽑는다. 이처럼 높은 에네르기를 가진 대전립자로 원자핵을 타격하여 핵반응실험 같은것을 진행한다.

문제

1. 전자선이 그림 3-27에서 Oz축의 정의 방향으로 입사한다. 이 전자선이 zy평면의 점에 만드는 자기마당은 어느 방향으로 향하겠는가? 어느 표현이 정확한가를 아래에서 선택하여라.
   ㄱ) $+x$축방향으로 향한다.
   ㄴ) $+y$축방향으로 향한다.
   ㄷ) $-x$축방향으로 향한다.
   ㄹ) $-y$축방향으로 향한다.

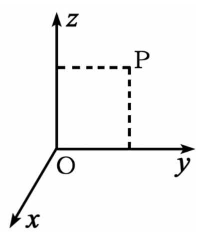


그림 3-27

2. 전기줄에 전류가 흐를 때 전기줄에 대하여 평행으로 운동하는 전자는 어떤 힘을 받겠는가?(그림 3-28)

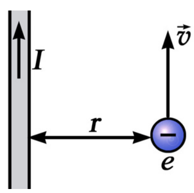


그림 3-28

3. 질량이 m이고 전기량이 q인 양전하가 자기마당의 경계면 ab에 있는 구멍 M으로 면에 대해 $\alpha=30°$의 각을 이루고 입사한다.(그림 3-29) 양전하의 속도가 $\vec{v}$, 자기마당의 자기유도가 $\vec{B}$이고 입사방향과 자기마당이 수직이라면 전하는 얼마만한 시간이 지나서 면에 다시 이르겠는가? 그리고 M점에서 얼마만큼 떨어진 점까지 이르겠는가?

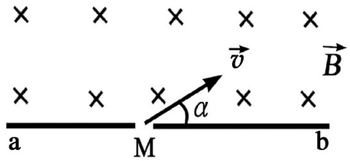


그림 3-29

제 6 절. 전자선관

전기마당과 자기마당속에서 전자가 받는 힘은 전자기구들과 TV수상관, 콤퓨터의 영상표시장치들에서 여러가지 형태로 쓰이고있다.

전자선오씰로그라프

전자선오씰로그라프는 전기마당속에서 전자의 운동자리길이 편기되는 성질을 리용하여 여러가지 전기적신호들을 눈으로 직접 관측할수 있게 하는 전자기구이다.

그러면 전자선오씰로그라프는 어떤 원리로 동작하는가.

전자선오씰로그라프에서 기본부분은 전기적신호를 빛신호로 바꾸는 **전자선관**(또는 **브라운관**)이다.(그림 3-30)


그림 3-30. 전자선관

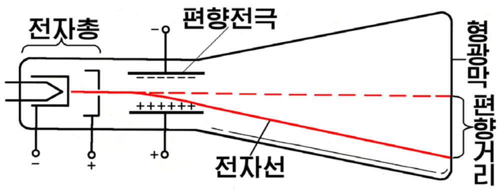


그림 3-31. 전자선관에서 전자선의 편기

그림 3-31은 전자선관에서 전자의 운동자리길이 편기되는 원리를 보여준다.

여기서 전자총은 음극에서 나온 전자들을 한줄기로 모아 가속시켜 내쏘는 역할을 한다.

전자총에서 나오는 전자들의 흐름을 **전자선**이라고 부른다.

전자선은 두 극판으로 된 편향전극을 지나 형광막을 타격한다. 이때 전자가 타격한 자리에서 빛이 생겨 눈으로 볼수 있다.

편향전극에 아무런 전압이 걸리지 않으면 전자선은 곧추 나가 형광막의 중심을 타격한다. 그래서 형광막의 가운데에 밝은 빛점이 생긴다.

편향전극에 전압을 걸면 그사이에 전기마당이 생기고 전자들은 전기힘을 받으므로 전자선이 구부러진다. 이때 전자들의 운동은 중력마당에서 수평으로 던진 물체의 운동과 비슷하다.

<u>형광막에서 전자선이 중심으로부터 편기되는 거리는 편향전극에 걸어준 전압에 비례한다.</u>

실지의 전자선관에는 서로 수직으로 배치된 두쌍의 편향전극이 있다.(그림 3-32)

여기서 전자선을 좌우로 편향시키는 전극을 **수평편향전극**, 아래우로 편향시키는 전극을 **수직편향전극**이라고 부른다.

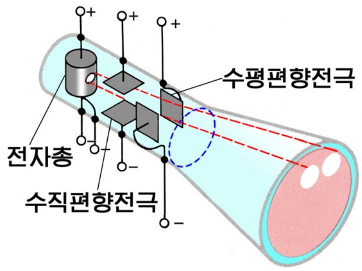


그림 3-32. 전자선관의 구조

수평편향전극에는 톱날모양으로 변하는 **전개전압**이 걸린다.(그림 3-33) 이 전압에 의해서 전자선은 좌우로 편기되는데 전개전압의 주파수가 높으면 형광막에는 한개의 가로선이 생긴다.

수직편향전극에 관측하려는 신호전압(실례로 시누스모양으로 변하는 전압)을 걸어주었다고 하자. 이때 전자들은 전개전압에 의해 좌우로 편기되는것과 동시에 신호전압에 의해서 아래우로 편기된다. 이 두 운동의 합성에 의해 형광막에는 시누스모양의 곡선이 나타난다.

전개전압의 주기가 신호전압의 주기와 꼭같거나 그의 옹근수배인 때 형광막에는 한주기 또는 몇주기의 신호전압모양이 고착되여보인다. 이때 두 전압은 **동기**되였다고 한다. 동기되지 않으면 왼쪽 또는 오른쪽으로 흐르는 신호전압모양이 나타난다.

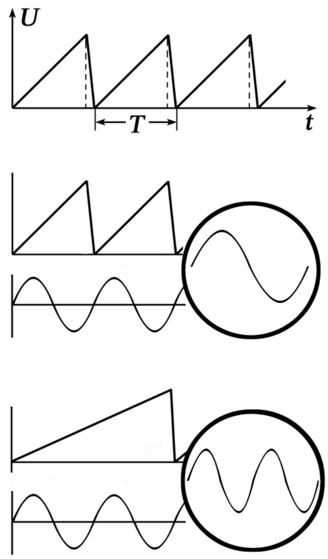


그림 3-33. 동기

이처럼 전자선오씰로그라프에 의해서 전기적신호의 모양을 직접 눈으로 볼수 있다. 오씰로그라프는 전자공학에서 측정수단으로서 널리 쓰이고있다.

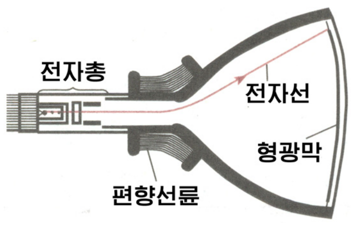


그림 3-34. TV수상관

TV수상관

TV수상관도 전자선관의 한 형태이다.(그림 3-34) 여기서는 전자선을 편향시키는데 전기마당이 아니라 자기마당을 리용한다.

❓ TV수상관에서는 어떻게 자기마당으로 전자선을 편향시키는가.

TV수상관의 형광막은 오씰로그라프의 형광막보다 크다. 그래서 전자선을 더 세게 편향시켜야 하며 이를 위해서는 편향전극들에 15kV정도의 빨리 변하는 전압을 걸어주어야 한다. 이것은 실현하기가 힘들다.

그러나 자기마당에 의한 편향을 위해서는 1A정도의 톱날모양으로 변하는 전류이면 충분하므로 비교적 쉽게 실현할수 있다.

TV수상관의 목에는 서로 수직으로 사귀는 자기마당을 만들어주기 위한 편향선륜이 설치되여있다.

여기에 전류가 흐르면 자기마당이 생기고 전자들이 자기힘을 받아 편기된다.

자기마당속에서 전자는 원운동 또는 라선운동을 한다.

그러면 TV수상관에서 전자는 왜 이런 운동을 하지 않고 편기만 되겠는가.

그림 3-35와 같이 좁은 구역에만 분포된 자기마당을 전자선이 수직으로 지난다고 하자. 전자의 입사속도가 대단히 작으면 전자는 반경이 작은 원운동을 하게 된다. 그러나 전자의 입사속도가 대단히 크면 원운동할새가 없이 약간 편기된 상태에서 자기마당을 벗어나고 만다. 이렇게 전자선은 자기마당에 의해 편기된다.

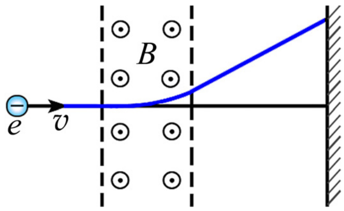


그림 3-35. 자기마당에 의한 전자의 편기



질량분석기

미시립자들의 질량은 대단히 작으며 그것들의 크기도 작아서 맨눈으로는 볼수 없다. 그러면 이와 같은 미시립자들의 질량을 어떻게 재겠는가.

질량분석기는 대전립자가 로렌쯔힘을 받는 원리를 리용하여 미시립자들의 질량을 측정하고 분석하는 장치이다.(그림 3-36)

이온원천 S_1에서 전기량이 q이고 질량이 m인 대전립자가 발생하였다고 하자. 이 립자는 이온원천 S_1와 질량분석기의 입구 S_2사이에 걸린 전압에 의하여 가속된다. 이 립자는 입사방향에 수직으로 향한 고른자기마당 B속에서 반원운동을 하고 사진필림면을 타격하여 감광시킨다. 이때 립자의 원운동자리길반경은

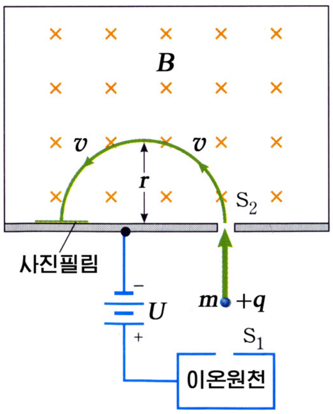


그림 3-36. 질량분석기의 원리

$$r=\frac{mv}{qB}=\frac{m}{qB}\sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

로 주어진다. 립자의 전기량이 주어지고 U와 B가 확정된 조건에서는 식

$$m=\frac{qB^2r^2}{2U}$$

에 의하여 r만을 정확히 재면 대전립자의 질량을 결정할수 있다.

질량분석기에 의해서는 또한 동위원소들을 질량별로 갈라 분석할수 있다.

TV수상관에서 영상이 맺히는 리치도 전자선오씰로그라프에서와 같다.

콤퓨터의 영상표시장치의 구조와 동작원리도 TV수상관과 비슷하다.

생각하기 전자선관에서 영상의 밝고 어두움은 무엇으로써 조절해야 하는가?

문제

1. 전자선오씰로그라프에서 신호전압의 주기가 전개전압의 주기보다 약간 크면 형광막에 생기는 신호전압모양은 어느쪽으로 흐르겠는가?
2. 오씰로그라프에서 형광막을 때리는데 전자선을 쓰지 않고 α 알갱이와 같은 무거운 대전립자의 흐름을 리용한다면 기구의 어떤 성능이 떨어지겠는가?
3. 전자선관에서는 전자가 편향되는 거리가 편향전극에 걸린 전압에 비례하기때문에 전개전압은 한 주기사이에 직선으로 증가한다. 편향거리가 편향전극전압의 두제곱에 비례한다고 가정해보고 걸어주어야 할 전개전압의 모양을 그려보아라.

제 7 절. 물질의 자화

수업이 시작되고 끝나는 시간을 알려주는 전기종에는 전자석이 들어있다. 전자석은 종을 때리는 망치를 당겼다놓아주었다하면서 종소리를 내게 한다.

전기종뿐아니라 전자석기중기, 계전기 등 많은 전기기구와 기계들에서도 전자석을 쓰고있다.

전자석은 어떻게 철로 된 물체를 세게 끌어당기는가.

물질의 자화

? 자석이 못과 같은 철쪼각들을 끌어당기는 원인은 무엇인가.

철쪼각들끼리는 서로 끌거나 밀지 못한다. 그것은 이것들이 주위에 자기마당을 만들지 못하기때문이다.

자석은 자기마당을 만들지만 철쪼각은 자기마당을 만들지 못한다. 그러므로 자기마당의 호상작용을 생각할수 없으며 철쪼각은 끌리지 말아야 한다. 그러나 철쪼각이 자석에 끌리는것은 자석의 자기마당속에서 철쪼각도 새로운 자기마당을 만들기때문이다. 이처럼 외부자기마당속에서 자기적성질(자성)을 띠는 현상을 **자화**라고 부르며 자화되는 물질을 **자성체**라고 부른다.

전자석에 전류가 흐르면 자기마당이 생긴다. 이 자기마당에 의해 전자석의 철심이 자화되면서 보충자기마당을 만든다. 보충자기마당은 대단히 세기때문에 큰 힘으로 철로 된 물체들을 끌어당긴다.

투 자 률

자성체가 자화되는 정도는 물질마다 각이하다.

자성체를 자화시키는 외부자기마당의 자기유도를 B_0 이라고 하자. 이때 자화된 자성체안에서의 자기유도를 B 라고 하자. 이때 비 B/B_0 을 자성체의 **투자률**이라고 부른다. 즉

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad \text{투 자 률}$$

⚠ 자기유도 B 는 외부자기마당과 자화된 자성체가 만드는 보충자기마당의 중첩으로 나타나는 값이다.

투자률은 자화된 자성체속에서의 자기마당이 외부자기마당에 비해 몇배나 커지는가를 나타내는 량이다. 즉 자화정도를 나타낸다.

아래의 표에는 몇가지 물질들의 투자률을 제시하였다.

몇가지 물질들의 투자률

자성체의 종류	자 성 체	투 자 률
상자성체	공 기	1.000 000 4
	알루미니움	1.000 023
	마그네시움	1.000 012
반자성체	수 은	0.999 97
	동	0.999 99
	물	0.999 99
강자성체	코발트	250
	니 켈	600
	철	5 000
	파말로이(55%Fe, 45%Ni)	25 000
	규소강(Fe, 1~4%의 Si)	10 000이상
	알리코(Fe, Al, Ni, Co 등의 합금)	40 000이상

표에서 알수 있는것처럼 자성체는 그의 자화정도에 따라 상자성체, 반자성체, 강자성체로 나눈다.

상자성체의 투자률은 1보다 약간 크다. 이것은 상자성체속에서 자기마당이 외부마당보다 약간 커졌음을 나타낸다. 그러므로 상자성체는 외부자기마당방향으로 매우 약한 자기마당을 만들면서 자화된다.

반자성체의 투자률은 1보다 약간 작다. 이것은 반자성체속에서 자기마당이 외부마당보다 약간 작아졌음을 나타낸다. 그러므로 반자성체는 외부자기마당과 반대방향의 약한 자기마당을 만들면서 자화된다. 알루미니움이나 동으로 된 물체들이 자석에 끌리지 않는

것은 이것들이 자석의 자기마당속에서 자화되면서 만드는 자기마당이 대단히 작으므로 자기적호상작용이 약하기때문이다.

강자성체의 투자률은 수백~수만정도이다. 이것은 강자성체가 외부마당방향으로 대단히 큰 자기마당을 만들면서 자화된다는것을 보여준다. 그러므로 자석에 붙은 강자성체도 역시 자석이 되여 다른 강자성체를 또 끌어당긴다.(그림 3-37)

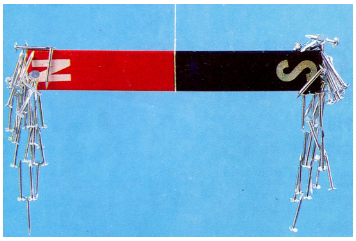


그림 3-37. 강자성체의 자화

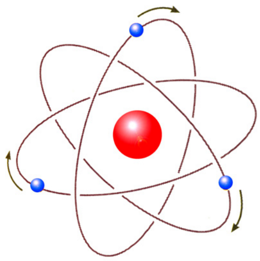
전자석에 강자성체인 규소철심을 넣는것은 바로 센 자기마당을 만들어 물체를 쉽게 끌어당기자는데 있다.

상자성체의 자화원인

상자성체가 어떻게 자화되는가를 보자.

자화원인은 물질속에 있는 전류에서 찾아야 한다. 물질들을 쪼개여나가면 맨나중에는 분자, 원자에 이르게 된다. 원자나 분자에는 핵주위로 돌아가는 전자들이 있다.

이 전자들은 하나의 닫긴전류를 이루는데 이것을 **분자전류**라고 부른다.(그림 3-38)


그림 3-38. 분자전류

분자전류들은 마치 원전류와 같은 자기마당을 만든다고 볼수 있다. 그러므로 분자전류를 분자, 원자크기정도의 작은 자석으로 생각할수 있다.

보통상태에서 분자, 원자들은 무질서하게 열운동을 하므로 분자전류들이 만드는 자기마당도 각이한 방향으로 다 향한다. 그래서 상자성체전체로서는 자기마당을 만들지 못한다.(그림 3-39의 ㄱ)

그러나 외부자기마당속에서는 자기모멘트가 외부마당으로 향하게 하는 짝힘이 닫긴전류에 작용한다. 그리하여 모든 분자전류들의 자기마당이 외부자기마당방향으로 정돈된다. 따라서 상자성체는 보충자기마당을 만들면서 자화된다.(그림 3-39의 ㄴ)

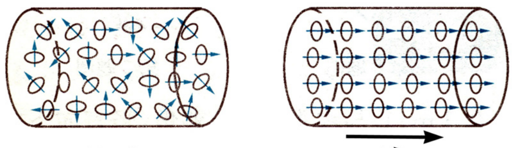


그림 3-39. 물질의 자화원인

※ 반자성체의 자화는 상자성체의 자화과정으로는 설명되지 않는다. 개별적원자 또는 분자에서 여러 전자들이 이루는 자기마당이 서로 지워져 원자 또는 분자의 자기마당이 령인 물질들에서만 반자성효과가 나타난다. 그러므로 이런 물질들에서는 상자성효과가 나타나지 않는다. 반자성체들에서는 핵주위에서 회전운동을 하던 개별적인 전자들이 외부자기마당에 의하여 세차운동을 동시에 하는데 이때 외부자기마당과 반대로 되는 약한 자기마당이 생긴다.

문 제

1. 세게 자화되는 반자성체가 있다면 이것은 자석에 끌려야 하는가 아니면 밀려야 하는가?
2. 전기와 자기의 련관을 해명한 에르스테드의 일화에서 배의 라침판이 머저리가 된 원인을 설명하여라. 벼락의 자력선을 그리고 설명해보아라.
3. 상자성체의 자화정도는 온도에 따라서 어떻게 달라지겠는가?

제 8 절. 강자성체

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《반도체와 함께 유전체, 자성체에 대한 연구사업도 강화하여야 합니다.》

강자성체는 전동기와 변압기, 발전기들과 같은 전기기계들과 측정계기, 록화기, 콤퓨터와 같은 전자장치들에서 없어서는 안될 전자재료로 유용하게 쓰이고있다.

그러므로 강자성체의 성질을 잘 알아야 더 좋은 전자요소들을 만들어낼수 있다.

상자성체와 반자성체는 자기적인 성질을 잘 나타내지 않으므로 자성재료로는 얼마 쓰이지 않는다. 그래서 자성체라고 하면 강자성체를 념두에 둔다.

투자률이 1보다 훨씬 큰 자성체를 **강자성체**라고 부른다. 강자성체에는 Fe, Ni, Co와 이것들이 포함되여있는 합금들이 속한다.

그러면 강자성체는 어떤 구조를 가지고있으며 어떤 성질을 나타내겠는가.

자발자화구역

강자성체인 규소강판겉면을 잘 연마하고 그우에 사삼산화철가루를 탄 비누물방울을 떨구고 현미경으로 관찰해보자. 그러면 철가루들이 몰켜 어떤 경계를 이루고있는것을 볼수 있다. 이때 개별적인 구역들은 어떤 방향으로 이미 자화되여있다.(그림 3-40)

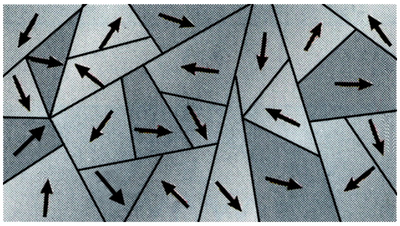


그림 3-40. 자발자화구역

이렇게 강자성체에서 외부자기마당이 없어도 미리 자화되는 현상을 **자발자화**라고 부르고 자발자화되여있는 구역을 **자발자화구역**(간단히 **자구**) 또는 **도멘**이라고 부른다. 그리고 자구들의 경계면을 **자벽**이라고 부른다.

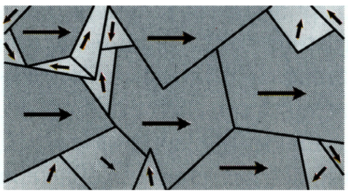


그림 3-41. 강자성체의 자화

자기마당이 없을 때 자발자화구역들의 자화방향은 무질서하므로 자성체전체로서는 자기마당을 만들지 못한다. 규소강판들이 자석처럼 서로 끌지 못하는것도 이때문이다.

규소강판에 자기마당을 걸어주면서 현미경으로 관찰하면 자기마당과 자화방향이 비슷한 자발자화구역들이 이웃구역들을 먹어들어가는것을 볼수 있다.(그림 3-41)

자기마당을 더 크게 해주면 강자성체는 전체로서 외부마당방향으로 자화된다.

그래서 강자성체는 외부자기마당방향의 보충자기마당을 만든다. 이때 생기는 보충자기마당은 외부마당에 비하여 대단히 크다. 그러므로 강자성체의 투자률은 특별히 크다.

강자성체의 성질

강자성체는 자발자화구역을 가지고있으므로 몇가지 흥미있는 성질을 나타낸다.

자기리력현상. 강유전체와 마찬가지로 강자성체도 리력현상을 나타낸다.

강자성체에 걸어준 외부자기마당을 변화시키면서 강자성체가 자화되는 정도를 재서 그라프를 그리면 그림 3-42와 같다. 외부자기마당을 점점 크게 하면 강자성체의 자화는 곡선 Oa를 따라 커지다가 어느때 가서는 더 커지지 않는다.(포화자화)

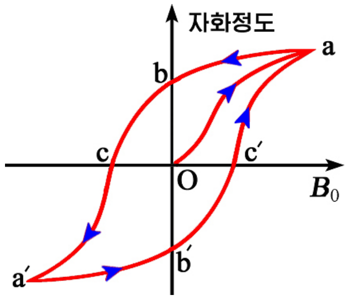


그림 3-42. 자기리력곡선

이 상태에서 자기마당을 점점 작게 하면 자화는 곡선 ab를 따라 작아진다. 그리하여 외부자기마당을 령으로 하여도 Ob만 한 자화가 남는다. 이것을 **잔류자화**라고 부른다.

잔류자화를 없애려면 처음과 반대방향으로 자기마당을 걸어주어야 하는데 이 자기마당의 크기를 **보자력**이라고 부른다.

강자성체의 자화곡선을 보면 그의 자화정도가 그때의 외부자기마당의 크기뿐아니라 이미 얼마만한 자기마당속에 놓여있었는가 하는 <리력>에도 관계된다. 이와 같은 현상을 **자기리력현상**이라고 부르며 강자성체의 자화정도를 보여주는 그라프를 **자기리력곡선**이라고 부른다.

※ 주기적으로 변하는 자기마당이 강자성체를 자화시킬 때 일이 수행되는데 이것은 강자성체를 덥히는데 소모된다. 이때 소모되는 에네르기를 **철손실** 또는 **자기리력손실**이라고 부른다. 철손실은 자기리력곡선이 둘러싸는 면적이 클수록 크다.

큐리온도. 강자성체를 가열하면 그의 성질이 어떻게 되겠는가.

이때 자발자화구역을 이루는 분자전류들이 세차게 열운동하므로 자발자화구역이 없어진다. 그래서 강자성체는 상자성체로 되고만다.

강자성체가 상자성체로 넘어가는 온도를 **큐리온도(큐리점)**라고 부른다.

철과 니켈, 코발트의 큐리온도는 각각 1 043K, 631K, 1 393K이다.

자기변형. 강자성체가 자화될 때 자발자화구역의 길이와 너비가 변한다. 이때 강자성체전체로서의 길이와 너비가 달라진다. 이와 같은 현상을 **자기변형**이라고 부른다.

자기변형현상이 일어나는것은 자발자화구역들에서 자화방향과 그에 수직인 방향에서의 길이가 서로 다르기때문이다. 자화방향의 길이가 그에 수직인 방향에서의 길이보다 큰 자성체가 자화되면 외부자기마당방향으로 자성체의 길이가 늘어나고 그에 수직인 방향에서는 길이가 줄어든다.

강자성체의 분류와 리용

강자성체는 보자력이 큰가 작은가에 따라서 연자성체와 경자성체로 나눈다. 보자력이 작은것을 **연자성체**, 큰것을 **경자성체**라고 부른다.(그림 3-43)

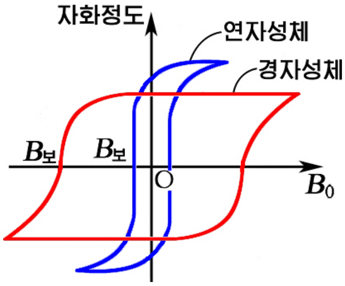


그림 3-43. 연자성체와 경자성체의 자기리력곡선

연자성체는 철손실이 작으므로 변하는 자기마당속에서 필요없이 나오는 열이 작다.

그래서 연자성체는 변압기, 발전기, 전동기 등의 교류전기기계들에서 선륜의 철심으로 널리 쓰인다.

잔류자화와 보자력이 큰 경자성체는 자화된 다음 자기의 자기적성질을 쉽게 잃지 않는다.

그러므로 이와 같은 경자성체로는 영구자석을 만든다.

강자성체의 자기리력현상은 그외에도 콤퓨터의 기억소자와 자기기록재료(록화테프, 록음테프, 자기원판 등)로 많이 쓰인다.

강자성체가 큐리온도를 가지는 성질은 자동조종요소로 쓰이며 자기변형현상은 출력이 센 초음파발생기를 만드는데 쓰인다.

※ 전자공학에서는 비금속강자성체(금속산화물강자성체)인 **훼리트**가 많이 쓰인다.
훼리트는 전기저항이 크고 리력곡선이 직각모양을 띠고있는것들도 있으므로 초고주파공학에서의 자심재료로, 콤퓨터의 기억소자로 쓰이고있다.



계전기의 철심으로 경자성체를 쓰지 않고 연자성체를 쓰는 리유는 무엇인가?

문제

1. 전자석기중기는 왜 방금 부어낸 시뻘겋게 단 강괴를 들어올리지 못하는가?
2. 자기리력곡선을 보고 강자성체의 어떤 특성량들을 알수 있는가?
3. 영구자석을 만드는 강자성체는 왜 잔류자화뿐아니라 보자력도 커야 하는가?

탐구

문제. 같은 방향으로 같은 전류가 흐르는 두 원전류가 일정한 거리에 떨어져서 만드는 자기마당을 《자기병》이라고 부른다. (그림 3-44) 《자기병》에 전기띤 알갱이가 갇히우는 원리를 해명하여보아라.

방향. 《자기병》이 만드는 축대칭자기마당을 그리고 여기에 입사한 전기띤 알갱이가 받는 로렌쯔힘을 따져보아라. 이때 자기마당의 방향이 자력선의 접선방향으로 향한다는것을 고려하여야 한다. 전하가 《자기병》속에 갇히여 왔다갔다하는 자리길을 그려보아라.

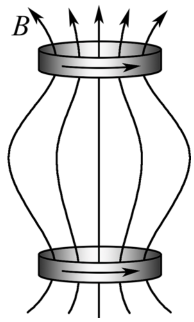


그림 3-44. 자기병

복습문제

1. 그림 3-45에서 스위치 K를 닫으면 선륜의 자극과 지북침의 N극이 향하는 방향은 다음과 같다. 아래의 판단에서 정확한 것을 선택하여라.

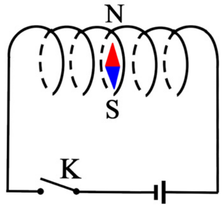


그림 3-45

ㄱ) 선륜의 왼쪽은 N극이며 지북침의 N극은 왼쪽으로 향한다.
ㄴ) 선륜의 왼쪽은 S극이며 지북침의 N극은 왼쪽으로 향한다.
ㄷ) 선륜의 왼쪽은 N극이며 지북침의 N극은 오른쪽으로 향한다.
ㄹ) 선륜의 왼쪽은 S극이며 지북침의 N극은 오른쪽으로 향한다.

2. 라침판의 지북침이 북남을 가리키고있다. 여기에 동쪽방향으로 다른 자기마당을 걸어주니 지북침이 시계바늘방향으로 60° 만큼 돌아갔다. 걸어준 자기마당은 지구자기마당의 몇배이겠는가? (**답.** $\sqrt{3}$ 배)

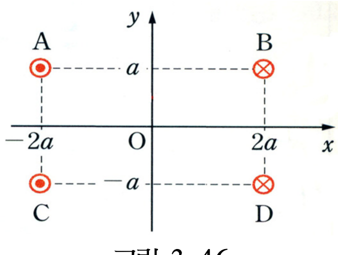


그림 3-46

3. 그림 3-46에서처럼 4개의 직선도선 A, B, C, D에 꼭 같은 전류들이 흐른다. A와 C로는 종이면을 뚫고나오는 방향으로, B와 D로는 뚫고들어가는 방향으로 전류가 흐른다. 전류도선에 수직인 자리표계의 O점에서 매개 전류들이 만드는 자기마당을 합성해보아라.

4. 그림 3-47과 같이 말굽자석을 매달아놓고 그아래에 직선도선을 고정해놓았다. 직선도선에 그림과 같은 방향으로 전류를 통과시킬 때 말굽자석은 어떤 운동을 하겠는가?
(**답.** N극이 종이면우로, S극이 종이면아래로 향하는 힘을 받아 돌아간다.)

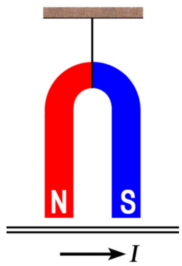


그림 3-47

5. 그림 3-48에서처럼 전류 I_1가 흐르는 고정된 직선도선아래에 전류 I_2이 그림처럼 흐르는 4각형도선틀이 있다. 이때 도선틀은 어떻게 운동하겠는가? 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 직선도선으로부터 멀어지는 운동을 한다.

ㄴ) 직선도선에 가까와지는 운동을 한다.

ㄷ) OO′를 축으로 하여 회전한다.

ㄹ) NN′를 축으로 하여 회전한다.

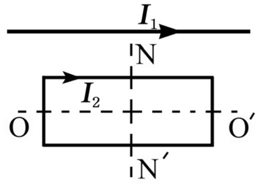


그림 3-48

6. 반경이 $r=5$cm이고 권회수가 $N=10$회인 원형도선에 $I=0.4$A의 전류가 흐른다. 원전류면의 중심에서 자기유도의 크기는 얼마인가? (**답.** $1.6\pi\times10^{-5}$ T)

7. 그림 3-49와 같이 전류 I_1가 흐르는 직선도선옆에 시계바늘방향으로 전류 I_2이 흐르는 직4각형도선틀이 한 평면내에 놓여있다. PQ=a, QR=b이며 CD와 PQ사이의 거리는 r이다.

ㄱ) PQ부분이 직선도선으로부터 받는 힘의 크기와 방향을 구하여라.

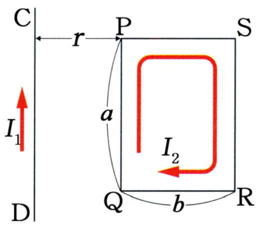


그림 3-49

ㄴ) RS부분이 직선도선으로부터 받는 힘의 크기와 방향을 구하여라.

ㄷ) PS와 QR가 받는 힘은 서로 지워진다. 이때 도선틀전체가 받는 힘은 얼마이며 어느쪽으로 향하겠는가?

(**답.** ㄱ) $\dfrac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}a$ 왼쪽으로 ㄴ) $\dfrac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi(r+b)}a$ 오른쪽으로 ㄷ) $\dfrac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r(r+b)}ab$ 왼쪽으로)

8. 그림 3-50에서처럼 간격이 10cm인 두 평행도선이 수평면과 30°의 각을 이루고있다. 여기에 전동력이 3V이고 내부저항이 0.5Ω인 전지를 련결하고 이 도선면에 수직으로 향하는 자기마당을 걸어주었다. 두 도선사이에 질량이 10g이고 저항이 1Ω인 도선막대기를 올려놓았더니 아무런 운동도 하지 않았다. 걸어준 자기마당의 자기유도는 얼마이며 어느 방향으로 향하겠는가? 도선들사이의 마찰은 무시한다.

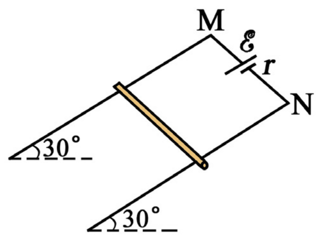


그림 3-50

(**답.** 0.245T 도선면아래로 향한다.)

9. 그림 3-51에서처럼 수직아래로 향하는 고른자기마당 B속에 간격이 L인 두 직선도선이 수평면과 θ의 각을 이루고있다. 질량이 m인 도선막대기 ab가 두 도선우에 그림에서처럼 정지하여있으려면 여기로는 얼마만한 전류가 어느 방향으로 흘러야 하는가?

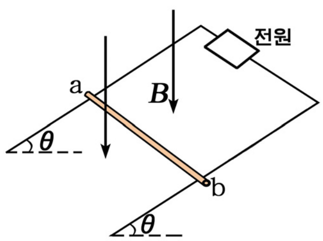


그림 3-51

(**답.** $I=\dfrac{mg}{LB}\tan\theta$, a에서 b로)

10. 그림 3-52에서 xy평면내에 있는 직4각형회로는 Ox축주위로만 회전할수 있다. 회로의 매 부분들은 x축과 y축에 평행이며 여기에 전류는 화살표방향으로 흐른다. 다음의 자기마당들가운데서 어떤 자기마당을 회로에 걸어주어야 이것이 회전할수 있겠는가를 선택하여라.

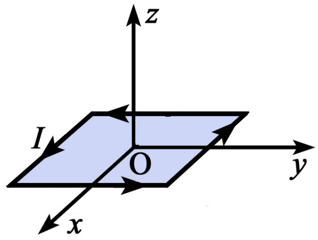


그림 3-52

ㄱ) x축방향으로 향하는 고른자기마당
ㄴ) y축방향으로 향하는 고른자기마당
ㄷ) z축방향으로 향하는 고른자기마당
ㄹ) y축과 반대방향으로 향하는 고른자기마당

11. 그림 3-53의 세 그림은 자기마당속에 놓여있는 닫긴회로들을 보여준다.
ㄱ) 그림의 ㄱ에서 닫긴회로는 어떻게 회전하겠는가?
ㄴ) 그림의 ㄴ를 우에서 내려다보면 닫긴회로가 시계바늘방향으로 회전한다. 자석의 극을 표시하여라.
ㄷ) 그림의 ㄷ를 우에서 내려다보면 닫긴회로가 시계바늘과 반대방향으로 회전한다. 회로에 흐르는 전류의 방향을 표시하여라.

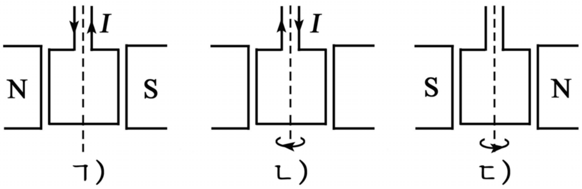


그림 3-53

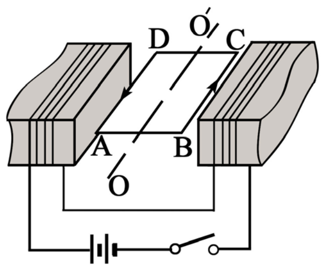


그림 3-54

12. 그림 3-54에서 닫긴회로로는 전류가 A→B→C→D→A방향으로 전류가 흐른다. 전자석에 스위치를 넣으면 닫긴회로가 어느 방향으로 회전하겠는가?

13. 점전하와 전류가 흐르는 전기줄이 그림 3-55와 같이 놓여있다. 점전하와 전기줄에 어떤 힘이 작용하며 그 방향은 어떠하겠는가?

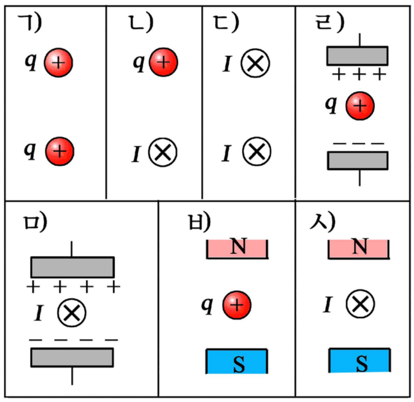


그림 3-55

14. 그림 3-56에서처럼 질량이 m, 전기량이 q인 음전하 P가 yz면내에서 y축과 30°의 각을 이루고 원점 O에 입사한다. 전하의 입사속도는 v이고 고른자기마당 B가 z축방향으로 걸려있다. 전하는 O점을 지나 라선운동을 하여 z축우의 $z=a$인 점 A를 지났다.

ㄱ) 점 O에서 전하의 입사속도의 y성분과 z성분을 구하여라.

ㄴ) 점 O에서 전하가 받는 로렌쯔힘의 크기와 방향을 구하여라.

ㄷ) z축우에서 내려다볼 때 얻게 되는 전하의 운동자리길을 그리고 운동방향을 화살표로 표시하여라.

ㄹ) 전하의 원운동자리길반경과 주기를 구하여라.

ㅁ) 전하가 점 O에서 A까지 운동할 때 몇바퀴 회전하였겠는가?

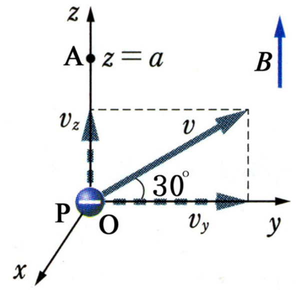


그림 3-56

(답. ㄱ) $v_y = \frac{\sqrt{3}}{2}v$, $v_z = \frac{1}{2}v$ ㄴ) $f = \frac{\sqrt{3}}{2}qvB$, x축의 부의 방향

ㄹ) $r = \frac{\sqrt{3}mv}{2qB}$, $T = \frac{2\pi m}{qB}$ ㅁ) $n = \frac{qBa}{\pi mv}$)

15. 그림 3-57의 매 경우에 대하여 전하가 받는 로렌쯔힘의 크기와 방향을 결정하여라. 여기서 $\vec{B}$는 자기마당을, $\vec{v}$는 전하의 속도를 표시한다.

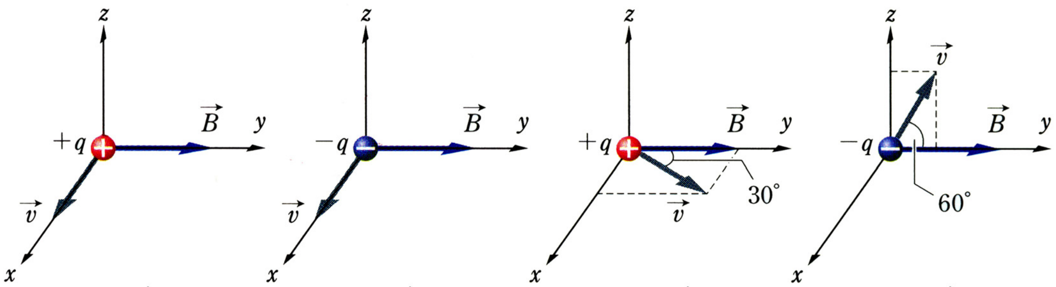


그림 3-57

(답. ㄱ) qvB, $+z$축방향으로 ㄴ) qvB, $-z$축방향으로

ㄷ) $\frac{1}{2}qvB$, $+z$축방향으로 ㄹ) $\frac{\sqrt{3}}{2}qvB$, $+x$축방향으로)

16. 그림 3-58은 싸이클로트론에서 전하의 운동자리길을 보여준다. 여기서 aa′와 bb′는 두 전극의 경계면이며 X, Y구역에만 종이면에 수직인 고른자기마당 B가 작용하고 Z구역에는 전하의 운동속도를 증가시키는 전기마당 E가 걸린다. 중간에 있는 이온원천 O에서는 질량이 m이고 전기량이 q인 대전립자가 발생한다. 이것은 aa′면에 수직으로 v_0의 속도로 입사하여 반원운동을 하고 다시 aa′에서 나와 bb′로 입사할 때 속도가 $2v_0$으로 되였다.

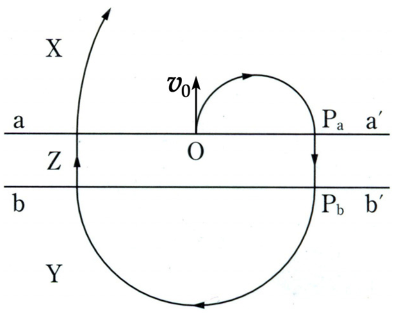


그림 3-58

ㄱ) OP_a사이의 거리 ℓ을 m, v_0, q, B로 표시하여라.
ㄴ) Z구역의 폭(P_aP_b사이거리) d를 m, v_0, q, E로 표시하여라.
ㄷ) 전하가 두번째로 X구역에 입사할 때의 속도는 v_0의 몇배이겠는가?
ㄹ) 전하가 Z구역을 n번 지날 때 전기마당이 한 일을 m, v_0, n으로 표시하여라.

(**답.** ㄱ) $\ell=\dfrac{2mv_0}{qB}$ ㄴ) $d=\dfrac{3mv_0^2}{2qE}$ ㄷ) $v=\sqrt{7}v_0$ ㄹ) $A=\dfrac{3}{2}nmv_0^2$)

17. 그림 3-59는 대전립자들의 속도선별기의 원리도를 보여준다. 여기서 서로 수직으로 걸어준 고른전기마당 E와 고른자기마당 B를 적당히 조절하면 어떤 속도를 가진 대전립자들은 곧추 운동하여 구멍으로 빠져나온다. 이런 립자들의 운동속도를 E와 B로 표시하여라. 중력은 무시한다.

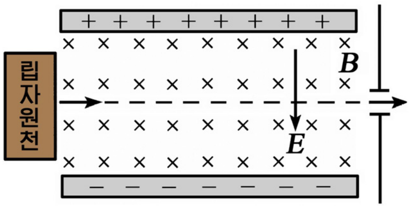


그림 3-59

(**답.** $v=E/B$)

18. 처음속도가 령이고 질량이 m, 전기량이 q인 대전립자가 가속전압 U에 의해 가속된 다음 A점을 지나 고른자기마당 $\vec{B}$에 수직으로 입사한다.(그림 3-60) 그다음 OD=OA인 점 D를 지나 x축방향으로 향한 고른전기마당 E에 수직으로 입사한 다음 C점에 이르렀다.(중력은 무시한다.)

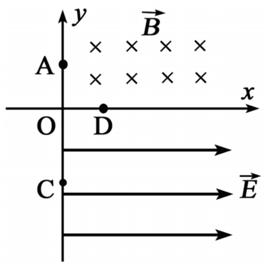


그림 3-60

ㄱ) 전하의 부호를 결정하여라.
ㄴ) OD의 크기를 q, m, B, U로 표시하여라.
ㄷ) C점에 이르렀을 때의 전하의 속도를 q, m, U, B, E로 표시하여라.

(**답.** ㄱ) 음전하 ㄴ) $\mathrm{OD}=\dfrac{m}{qB}\sqrt{\dfrac{2qU}{m}}$ ㄷ) $v_C=\sqrt{\dfrac{2q}{m}\left(\dfrac{E}{B}\sqrt{\dfrac{2mU}{q}}+U\right)}$)

19. 속도가 v인 전자선이 d만 한 폭에만 존재하는 고른자기마당 B에 수직으로 입사한다.(그림 3-61) 자기마당을 벗어날 때 전자선이 편기되는 각도를 구하여라.

(**답.** $\alpha=\arcsin\dfrac{eBd}{mv}$)

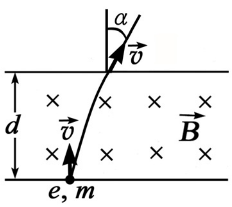


그림 3-61

20. 상자성체와 반자성체의 공통점과 차이점을 말하여라.

제 4 장. 전자기유도

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리 나라에는 강하천이 많은 조건에서 대규모수력발전소와 함께 중소형발전소들을 많이 건설하여야 전기문제를 풀수 있습니다.》

우리 나라에 풍부한 수력자원에 의거하는 발전소들을 많이 건설하자고 하여도 여기에 필요한 전기설비들을 원만히 생산하여 보내주어야 한다. 전력의 생산과 공급에서 핵심으로 되는 발전기와 변압기는 모두 전자기유도현상을 리용한 중요한 전기기계이다.



제 1 절. 전자기유도현상

전류는 자기마당을 만든다. 그렇다면 거꾸로 자기마당으로부터 전류를 얻어낼수 없겠는가.

영국의 물리학자 파라데이는 이러한 실머리를 쥐고 오래동안 실험을 거듭하던끝에 1831년에 마침내 자기마당으로부터 전류를 얻어내는 방법을 찾아내였다.

자력선묶음

자석가까이에는 자력선이 배좁게 분포되여있으며 자석으로부터 멀어질수록 성글어진다.

전력선과 마찬가지로 자력선을 그릴 때에도 어떤 면을 지나는 자력선의 수가 바로 이 면이 있는 곳에서 자기마당의 자기유도에 비례하도록 그린다.

자기마당속의 어떤 면을 지나는 자력선의 수와 같은 값을 가지는 량을 그 면을 지나는 **자력선묶음**이라고 부른다.

자기유도가 B인 자기마당에 수직인 면적 S_0을 지나는 자력선묶음 Φ는 다음과 같다.(그림 4-1)

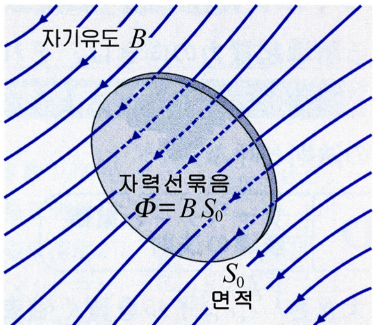


그림 4-1. 자력선묶음

$\Phi = B S_0$ 자력선묶음

$S_0 = 1\,\mathrm{m}^2$인 때 $\Phi = B$와 같다.

S_0이 주어진 조건에서는 자기유도가 클수록 자력선묶음도 크다.

이처럼 자기마당이 센 곳에서는 자력선이 배고 약한 곳에서는 성글다.

자력선묶음의 단위는 1Wb(**웨버**)이다. 1Wb는 자기유도가 1T인 자기마당속에서 마당에 수직인 $1\mathrm{m}^2$의 면적을 지나는 자력선의 수(자력선묶음)이다.

$$1\mathrm{Wb} = 1\mathrm{T} \times 1\mathrm{m}^2$$

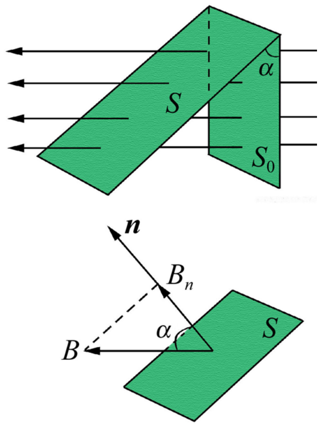


그림 4-2. 면 S를 지나는 자력선묶음

자기마당에 수직이 아닌 면 S를 지나는 자력선묶음은 어떻게 표시되는가.

그림 4-2와 같이 면적 S_0을 지나는 자력선들은 그대로 면적 S를 지난다. 그러므로 면적 S를 지나는 자력선묶음은 다음과 같다.

$$\Phi = BS_0 = BS\cos\alpha = B_n S$$

여기서 B_n은 면의 법선방향에 대한 자기유도벡토르 $\vec{B}$의 사영성분이다.

이로부터 자력선묶음은 자기유도의 크기, 면의 면적, 자기유도와 면이 이루는 각가운데서 어느 하나만이 달라져도 변한다는것을 알수 있다.

전자기유도

? 파라데이는 과연 어떤 방법으로 자기마당으로부터 전류를 얻어냈겠는가.

실험

○ 그림 4-3과 같이 검류계와 련결된 고리모양 선륜 A우에서 막대기자석을 아래우로 또는 좌우로 빨리 움직이면서 검류계의 바늘이 움직이는것을 관찰한다.

○ 막대기자석에 선륜 A를 넣었다뽑았다 해보고 자석주위에서 선륜을 움직여보면서 검류계의 바늘이 움직이는것을 관찰한다.

○ 직류가 흐르는 선륜 B를 역시 선륜 A둘레에서 아래우로, 좌우로 빨리 움직여본다.

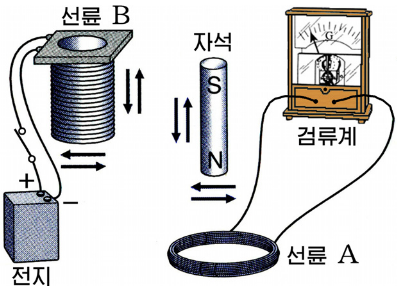


그림 4-3. 전자기유도현상의 관찰실험

○ 선륜가운데에 자석을 세워놓고 검류계의 바늘이 움직이는가를 본다.

실험에서 무엇을 알수 있는가.

선륜 A둘레에서 자석이나 선륜 B를 움직이기만 하면 검류계의 바늘이 움직인다.

사실 검류계와 선륜 A로 이루어진 닫긴회로에는 전원이 들어있지 않으므로 여기에 전류가 흐를수 없으며 검류계바늘도 움직이지 말아야 한다.

그러나 검류계의 바늘이 움직인것은 선륜 A에 전류가 흐르기때문이다.

선륜 A둘레에서 자석이나 선륜 B를 움직이면 선륜 A가 있는 곳에서의 자기마당이 변한다. 그러면 선륜 A를 지나는 자력선묶음이 변하게 된다.

그러나 선륜 A의 가운데에 자석을 세워놓고 가만 있으면 검류계의 바늘이 움직이지 않는다. 이때 선륜을 지나는 자기마당이 있다고 하여도 선륜에는 전류가 흐르지 않는다. 오직 이 자기마당이 변하여 선륜을 지나는 자력선묶음이 변할 때에만 선륜에 전류가 흐른다.

닫긴회로(선륜)를 지나는 자력선묶음이 변할 때 닫긴회로로 전류가 흐르는 현상을 **전자기유도**현상이라고 부르며 이때 흐르는 전류를 **유도전류**라고 부른다.

파라데이는 많은 실험을 통하여 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 어떤 방식으로 변하든지 관계없이 언제나 유도전류가 흐른다는것을 밝혀냈다.

닫긴회로를 지나는 자력선묶음을 변화시키는데는 자기마당을 변화시키는 방법, 닫긴회로의 면적을 변화시키는 방법, 닫긴회로면과 자기마당이 이루는 각을 변화시키는 방법이 있다.

이가운데서 력학적인 방법으로 회로면을 움직이여 자기마당과 이루는 각을 변화시키여 유도전류를 얻어내는것이 바로 발전기의 원리이다.

문 제

1. 그림 4-4와 같은 회로에서 검류계와 련결된 선륜에 유도전류가 흐르게 할수 있는 방법들을 지적하여라.

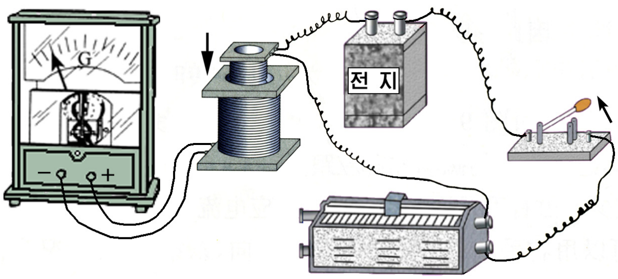


그림 4-4

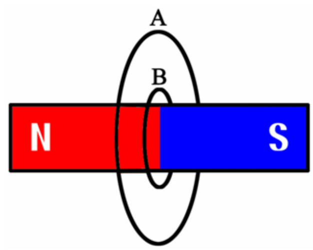


그림 4-5

2. 크기가 서로 다른 원형고리 A, B가 한 평면내에 있다. 여기에 막대기자석을 고리면들에 수직되게 끼워넣었다.(그림 4-5) 고리 A를 지나는 자력선묶음을 Φ_A, B를 지나는 자력선묶음을 Φ_B라고 할 때 다음의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $\Phi_A > \Phi_B$

ㄴ) $\Phi_A < \Phi_B$

ㄷ) $\Phi_A = \Phi_B$

ㄹ) 자력선묶음의 크기를 비교할수 없다.

3. 그림 4-6과 같이 일정한 구역 abcd에만 존재하는 고른자기마당이 있다. 닫긴회로가 1에서 2로 이 자기마당구역을 통과하면서 자리를 이동하였다. 운동과정에 닫긴회로에 유도전류가 흐르는 운동구간들을 지적하여라.

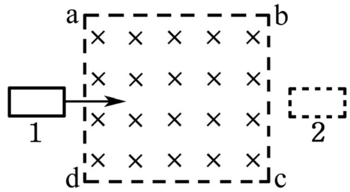


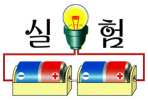
그림 4-6

제 2 절. 렌쯔의 규칙

닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 변할 때 생기는 유도전류는 어느 방향으로 흐르겠는가.

오른손의 규칙

유도전류는 검류계와 이어진 도선토막이 자기마당속에서 이동할 때에도 생긴다.



실 험

○ 검류계와 련결된 도선토막을 자석의 두 극사이에 빨리 넣으면서 검류계의 바늘이 어느 방향으로 움직이는가를 본다.(그림 4-7)

○ 다음 도선토막을 자석에서 빨리 뽑으면서 검류계의 바늘이 어느 방향으로 움직이는가를 관찰한다.

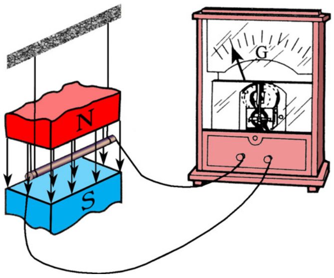


그림 4-7. 자기마당속에서 도선토막의 운동

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

도선토막을 말굽자석사이로 넣을 때와 뽑을 때에도 검류계의 바늘이 움직인다는것을 알수 있다. 또한 넣을 때와 뽑을 때 바늘이 움직이는 방향이 서로 반대이라는것도 알수 있다.

이것은 도선토막이 자기마당속에서 운동할 때에도 유도전류가 생기며 운동방향이 바뀔 때에는 유도전류의 방향도 바뀐다는것을 보여준다.

? 도선토막이 자기마당속에서 운동할 때 유도전류가 생기는 현상은 전자기유도현상과 무슨 차이가 있는가.

차이가 없다.

사실 도선토막을 말굽자석사이로 넣을 때에는 도선토막과 검류계로 이루어진 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 증가하고 뽑을 때에는 작아지는셈이다. 이것은 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 어떤 방식으로 변하든 유도전류가 흐른다는것을 보여준다.

도선토막으로 흐르는 유도전류의 방향을 따져보자.

도선토막이 자기마당속에서 운동할 때 도선속의 전자들은 로렌쯔힘을 받아 한쪽방향으로 운동한다. 이것이 결국 도선토막과 함께 이루어진 닫긴회로에 흐르는 유도전류로 된다. 그러므로 도선토막으로 흐르는 유도전류의 방향은 오른손을 펴고 따질수 있다.

오른손바닥으로 자력선이 들어가게 하고 엄지손가락으로 도선의 운동방향을 가리킬 때 그에 수직으로 편 네손가락이 유도전류의 방향을 가리킨다. 이것을 **오른손의 규칙**이라고 부른다.(그림 4-8)

오른손의 규칙은 자기마당속에서 운동하는 도선에 흐르는 유도전류의 방향을 결정해준다.

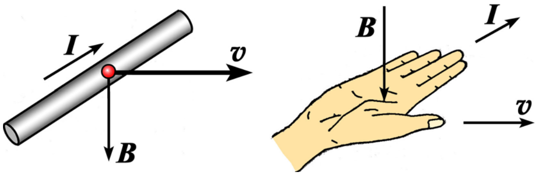


그림 4-8. 오른손의 규칙

렌쯔의 규칙

선륜속으로 자석을 넣을 때와 뽑을 때 검류계의 바늘이 반대방향으로 기울어진다. 이것은 이때 생기는 유도전류가 선륜을 따라 서로 반대로 흐른다는것을 보여준다.

그러면 선륜에 생기는 유도전류의 방향은 외부자기마당의 변화와 어떤 관계에 있겠는가. 렌쯔는 여러차례의 실험끝에 이것을 해명하였다.

실 험

○ 가벼운 알루미니움고리(닫긴회로)를 매달고 막대기자석을 이 고리속에 밀어넣는다. 이때 고리는 밀려난다.(그림 4-9의 ㄱ)

○ 다음 넣었던 자석을 뽑는다. 고리는 끌려온다.(그림 ㄴ)

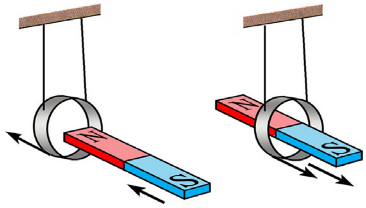


그림 4-9. 렌쯔의 규칙

실험에서 무엇을 알수 있는가.

고리안으로 자석을 넣을 때와 뽑을 때 고리와 자석사이에 자기힘을 주고받는다는것을 알수 있다. 즉 자석을 넣을 때와 뽑을 때 고리에 유도전류가 흐르면서 이것이 만드는 자기마당과 자석의 자기마당이 호상작용을 한다는것을 알수 있다.

자석의 같은 극끼리는 밀며 다른 극끼리는 끈다.

자석을 넣을 때 고리를 지나는 자력선묶음은 커진다.

한편 고리가 밀려났다는것은 여기에 생긴 유도전류가 만드는 자기마당이 자석의 자기마당과 방향이 반대라는것을 보여준다. 그러므로 유도전류의 자기마당은 자력선묶음이 커지는것을 방해하는 방향으로 향한다.

자석을 뽑을 때 고리를 지나는 자력선묶음은 작아진다. 한편 고리가 끌려왔다는것은 여기에 생긴 유도전류가 만드는 자기마당이 자석의 자기마당과 방향이 같다는것을 보여준다. 그러므로 유도전류의 자기마당은 자력선묶음이 작아지는것을 방해하는 방향으로 생겼다.

이 두 경우를 보면 고리에 생기는 유도전류가 만드는 자기마당은 언제나 고리를 지나는 자력선묶음의 변화(증가, 감소)를 방해하는 방향으로 생긴다.

이처럼 유도전류는 그것을 일으키는 자력선묶음의 변화를 방해하는 자기마당을 만드는 방향으로 흐른다. 이것을 **렌쯔의 규칙**이라고 부른다.

렌쯔의 규칙은 닫긴회로에 생기는 유도전류의 방향을 결정해준다.

원형이 아닌 임의의 모양의 닫긴회로에 생기는 유도전류의 방향도 렌쯔의 규칙에 따른다.

문제

1. 그림 4-10과 같은 네가지 경우에 대하여 닫긴회로에 흐르는 유도전류의 방향을 결정하여라.

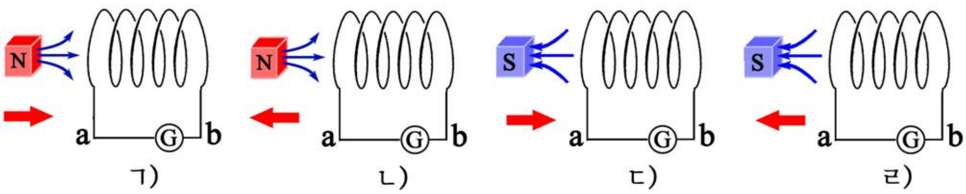


그림 4-10

2. 그림 4-11과 같이 고른자기마당에 수직으로 놓인 닫긴회로 CDEF우에서 도선토막 AB가 오른쪽으로 미끄러진다. 이때 왼쪽과 오른쪽에 있는 두 회로에 흐르는 유도전류의 방향을 표시하여라.

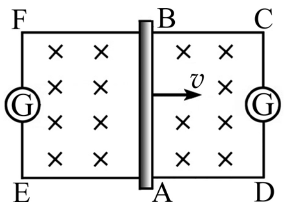


그림 4-11

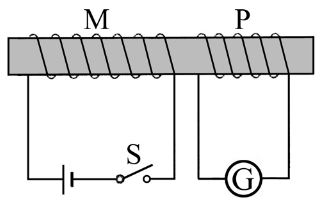


그림 4-12

3. 철막대기에 감긴 두개의 선륜 M과 P가 있다.(그림 4-12) 다음의 경우 검류계로 전류가 흐르겠는가? 흐르면 어느 방향으로 흐르겠는가?
   ㄱ) 스위치 S를 닫는 순간
   ㄴ) 선륜 M에 일정한 전류가 흐르고있을 때
   ㄷ) 스위치 S를 여는 순간

제 3 절. 전자기유도법칙

닫긴회로에 전류가 흐르자면 전동력이 있어야 한다. 전자기유도현상에 의하여 닫긴회로로 전류가 흐르는것은 회로안에 전지를 련결한것처럼 어떤 전동력이 생겼다는것을 보여준다.

유도전류를 흐르게 하는 전동력을 **유도전동력**이라고 부른다.

유도전동력의 크기가 무엇에 관계되는가를 살펴보자.

자기마당속에서 운동하는 도선토막에 생기는 유도전동력

고른자기마당 B속에서 마당과 θ의 각을 이루는 방향으로 길이가 ℓ인 도선토막을 v의 속도로 운동시킨다고 하자.(그림 4-13)

이때 도선토막속의 전자들도 함께 운동하므로 $f=evB\sin\theta$만 한 로렌쯔힘을 받아 한쪽으로 몰리게 된다.

전자가 몰린쪽은 전위가 낮아지고 반대쪽은 전위가 높아져 도선토막의 량끝에 전동력(유도전동력)이 생긴다.

이 전동력의 크기는 1C의 전기량을 도선토막의 한 끝에서 다른 끝까지 옮겨갈 때 수행한 일의 크기와 같다. 즉

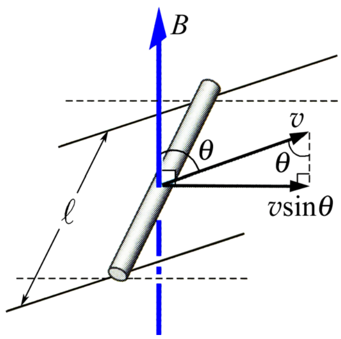


그림 4-13. 자기마당속에서 운동하는 도선토막

$$\mathscr{E}=\frac{A}{e}=\frac{f\cdot\ell}{e}=\frac{evB\sin\theta\cdot\ell}{e}$$

따라서 자기마당속에서 운동하는 도선토막에 생기는 전동력의 크기는 다음과 같다.

$\mathscr{E}=vB\ell\sin\theta$ **자기마당속에서 운동하는 도선토막에 생기는 유도전동력**

자기마당속에서 운동하는 도선토막에 생기는 유도전동력은 자기유도, 도선토막의 길이와 운동속도에 비례할뿐아니라 도선토막이 어느 방향으로 운동하는가에도 관계된다.

도선토막이 자기마당방향에 수직으로 운동할 때 생기는 유도전동력이 제일 크며 자기마당방향으로 운동할 때(자력선을 자르지 않을 때)에는 유도전동력이 생기지 않는다.

자기마당속에서 운동하는 도선토막의 량끝에 유도전동력이 생기므로 여기에 전기줄을 이어 닫긴회로를 이루면 여기로 전류(유도전류)가 흐른다.

⚠ 닫긴회로가 고르지 않은 자기마당속에서 운동할 때에는 유도전류가 흐른다.

생각하기 닫긴회로가 고른자기마당속에서 운동할 때 여기에 유도전류가 흐르겠는가?

전자기유도법칙

닫긴회로속으로 자석을 더 빨리 넣거나 뽑을수록 유도전류는 더 세진다.

이것은 닫긴회로속에 생기는 유도전동력의 크기가 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 빨리 변할수록 더 커진다는것을 의미한다.

❓ 유도전동력의 크기는 자력선묶음의 변화와 어떤 관계에 있겠는가.

그림 4-14와 같이 고른자기마당 B속에 그에 수직으로 폭이 ℓ인 ㄷ자형도선 ABCD가 있다고 하자. 그리고 이우에서 도선토막 PQ가 닫긴회로를 이루면서 속도 v로 이동한다고 하자.

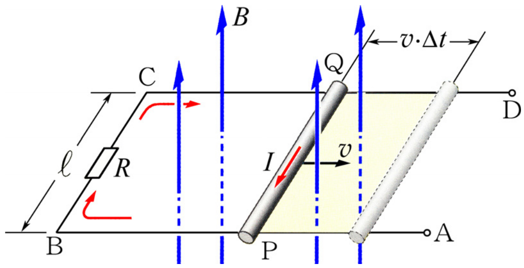


그림 4-14. 전자기유도법칙의 유도

이때 도선토막에는 $\mathscr{E}=vB\ell$만 한 유도전동력이 생기는데 이것이 바로 닫긴회로에 생기는 유도전동력으로 된다.

한편 Δt시간동안에 도선토막이 끊는 자력선묶음이 바로 이 시간동안에 닫긴회로를 지나는 자력선묶음의 변화량과 같다. 즉

$$\Delta\Phi = B\cdot\Delta S = B\,\ell\,v\cdot\Delta t$$

자료 **집게형전류계**

최근 전기줄에 흐르는 전류의 세기(교류)를 재는데 집게형전류계를 많이 리용한다. 이 전류계는 전기줄을 끊지 않고 전류의 세기를 편리하게 잴수 있기때문에 실험실에서뿐만아니라 현장들에서도 적합하다.

집게형전류계는 전자기유도법칙에 의해 동작한다. 그의 구조를 그림 4-15에 제시하였다.

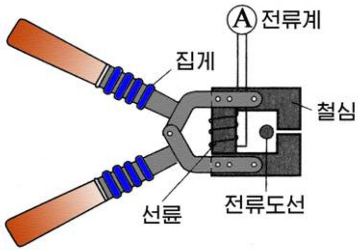


그림 4-15. 집게형전류계

집게를 벌려서 재려는 전류가 흐르는 전기줄을 감싼 다음 집게를 꽉 집는다. 그러면 전기줄에 흐르는 전류가 만드는 자기마당이 철심을 통해 닫기게 된다. 그런데 전기줄로는 교류가 흐르므로 자기마당도 변한다. 이에 따라서 선륜에는 측정하려는 전류의 세기에 비례하는 유도전동력이 생기고 유도전류가 흐른다. 그러므로 선륜과 련결된 전류계의 바늘은 전기줄에 흐르는 전류의 세기에 비례하여 바늘이 기울어진다.

우의 두 식으로부터 닫긴회로에 생기는 유도전동력을 구하면 다음과 같다.

$$\mathscr{E} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$ **유도전동력**

이처럼 닫긴회로에 생기는 유도전동력은 그것을 지나는 자력선묶음의 변화속도와 같다. 이것을 **전자기유도법칙** 또는 **전자기유도에 대한 파라데이의 법칙**이라고 부른다.

이 식은 닫긴회로의 면적이 변하지 않고 자기마당이 변하는 경우에도 그대로 성립한다.

권회수가 N인 선륜에 생기는 유도전동력의 크기는 어떻게 표시되겠는가.

전자기유도법칙에 의해 선륜의 매 권선에는 $\Delta\Phi / \Delta t$만 한 유도전동력이 생긴다.

선륜은 마치 이와 같은 전동력을 가진 전지들을 직렬로 이은것이나 같다.

그러므로 선륜의 량끝에 생기는 유도전동력은 다음과 같다.

$$\mathscr{E} = N\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

닫긴회로에 생기는 유도전동력을 크게 하려면 닫긴회로의 권회수를 크게 하고 자기마당을 될수록 빨리 변화시켜야 한다. 그리고 닫긴회로의 회로면적이 커야 하고 자기마당의 방향을 회로면에 수직이 되게 하여야 한다.

일화 전자기유도법칙의 발견

전자기유도법칙은 전기문명의 려명을 안아온 영국물리학자이며 화학자인 파라데이(1791-1867)가 발견하였다.

에르스테드의 발견이 있은 다음부터 파라데이는 전류가 자기마당을 만든다면 반대로 자기마당으로부터 전류를 얻을수 없겠는가 하는 생각을 하고 여러차례 실험을 거듭하였다.

그때로부터 10년이 지난 1831년 어느날 파라데이의 전자기유도법칙에 대한 공개실험이 진행되였다. 자기마당속에서 닫긴회로가 움직일 때 거기에 유도전류가 생긴다는 간단한 내용이였다.

공개실험을 구경하던 한 귀족부인이 한들거리는 전류계의 바늘을 보며 이까짓 장난감이 뭐 대단한것이기에 공개실험까지 하는가고 종알거렸다.

그러자 파라데이는 《부인, 그럼 부인이 안고있는 그 애기는 무엇에 필요한가요?》라고 점잖게 반박하였다.

바로 파라데이가 발명한 그 《장난감》으로부터 전기문명의 새 아침이 밝아오기 시작했던것이다.



전자기유도법칙은 렌쯔의 규칙을 고려하여 표시하면 다음과 같다.

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

이 식은 닫긴회로에 생기는 유도전동력뿐아니라 그의 방향(또는 유도전류의 방향)까지도 표시한다.

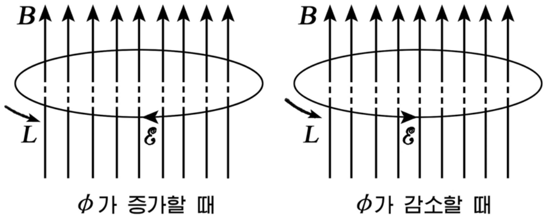


그림 4-16. 유도전동력의 방향결정

그림 4-16에서처럼 닫긴회로에서 L방향을 정의 방향으로 잡으면 자력선묶음이 증가할 때 $\Delta\Phi>0$이므로 $\mathscr{E}<0$이다. 즉 전동력은 부의 값을 가지므로 L방향과 반대로 생긴다. 그러나 자력선묶음이 감소할 때에는 $\Delta\Phi<0$이므로 $\mathscr{E}>0$이다. 즉 전동력은 정의 값을 가지므로 L방향으로 생긴다. 유도전류는 전동력이 생기는 방향으로 흐른다.

문제

1. $B=2\times10^{-2}$ T인 고른자기마당에 수직으로 직경이 20cm이고 저항이 0.1Ω인 도선고리가 놓여있다.(그림 4-17) 이 고리의 량쪽을 세게 당겨 0.5s사이에 고리를 직선으로 만들었다. 이때 고리에 흐르는 전류의 세기의 평균값과 방향을 구하여라.

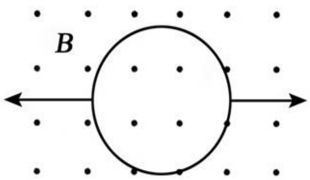


그림 4-17

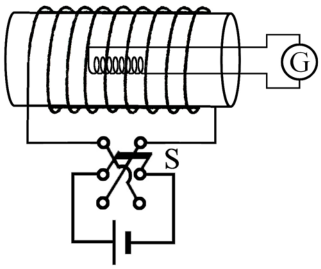


그림 4-18

2. 그림 4-18은 탄동검류계(회로로 흐른 전기량을 재는 기구)로 선륜이 만드는 자기마당의 자기유도를 재는 원리를 보여준다. 선륜속의 재려는 곳에 수감선륜(G와 련결된 작은 선륜)을 넣고 절환기 S로써 선륜으로 흐르는 전류의 방향을 바꾸면 수감선륜에 유도전류가 흐르므로 탄동검류계는 이때 흐른 전기량을 잰다. 수감선륜의 권회수는 2 000회, 직경은 2.5cm이며 수감선륜과 검류계를 포함한 닫긴회로의 전체 저항은 1 000Ω이다. 측정에서 탄동검류계로 $\Delta q=2.5\times10^{-7}$ C의 전기량이 흘렀다면 재려는 자기유도는 얼마이겠는가?

3. 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 그림 4-19와 같이 시간에 따라서 변한다. 다음의 시간구간에서 제일 큰 유도전동력이 생기는 구간은 어느것인가?

   ㄱ) 0s-2s　　　ㄴ) 2s-4s

   ㄷ) 4s-5s　　　ㄹ) 5s-7s

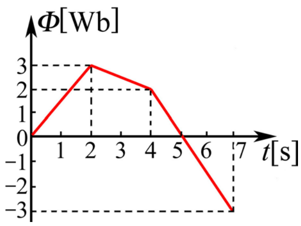


그림 4-19

제 4 절. 교류발전기

인민경제의 모든 분야뿐만아니라 우리의 가정과 학교들에 들어오는 전기는 모두 교류이다. 교류는 전자기유도현상의 원리로 동작하는 교류발전기에서 생산된다.

교류발전기에는 수십만kW의 큰 전력을 생산하는 큰 발전기도 있고 자전거전조등의 조명을 보장하는것과 같은 출력이 수W인 작은 발전기도 있다.

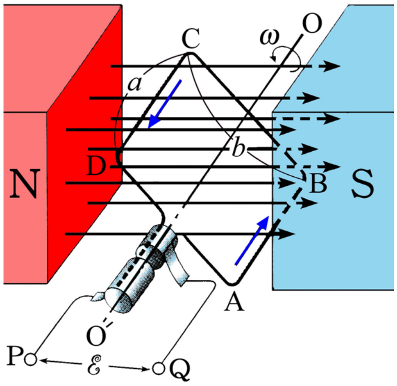


그림 4-20. 교류발전기의 원리

교류발전기의 원리

그림 4-20은 교류발전기의 원리를 보여준다. 교류발전기는 자기마당을 만드는 자석과 닫긴회로 그리고 닫긴회로에 생긴 전동력을 뽑아내기 위한 접촉고리와 접촉솔로 되여있다. 자석이 만드는 고른자기마당속에서 닫긴회로 ABCD를 돌려주면 회로의 AB와 CD부분만 자력선을 자르면서 운동한다. 이때 두 부분에 생기는 유도전동력의 합이 접촉고리와 접촉솔을 통하여 발전기의 출구단자로 나타난다.

자기마당의 자기유도를 B, 회로면의 길이와 너비를 각각 AB=a, BC=b라고 하자. 그리고 선륜을 일정한 각속도 ω로써 회전시킨다고 하자.

그러면 회로의 AB와 CD부분은 $v=\frac{1}{2}b\omega$의 선속도를 가지고 자력선을 자르는 회전운동을 하게 된다. 닫긴회로면의 법선이 자기마당과 θ의 각을 이루었을 때 회로의 AB와 CD부분에 생기는 유도전동력은 각각 $Bav\sin\theta$이고 이 두 부분은 직렬련결되였으므로 닫긴회로에 생긴 유도전동력은

$$\mathscr{E}=2\times Bav\sin\theta=2\times Ba\frac{1}{2}b\omega\sin\theta$$

로 된다.

닫긴회로가 회전하므로 θ도 부단히 변하며 유도전동력도 변한다.

t=0인 처음순간 θ=0으로 놓으면 어떤 t순간의 회전각은 $\theta=\omega t$로 표시된다. 그러므로 유도전동력은

$$\mathscr{E}=Bab\omega\sin\omega t=BS\omega\sin\omega t$$

와 같다. 여기서 $S=ab$는 닫긴회로의 면적이다.

닫긴회로의 권회수를 N이라고 하면 유도전동력은

$$\mathscr{E}=NBS\omega\sin\omega t$$

로 된다. 여기서 $\mathscr{E}_0=NBS\omega$로 표시하면

$$\mathscr{E}=\mathscr{E}_0\sin\omega t \quad \text{교류전동력}$$

이 얻어진다.

이처럼 교류발전기에서 얻어지는 전동력은 시간에 따라서 시누스모양으로 변한다.(그림 4-21) 그러므로 발전기가 내는 전압은 시간에 따라서 크기가 주기적으로 변하며 전압의 부호도 주기적으로 바뀐다. 이와 같이 크기와 부호가 주기적으로 변하는 전압을 **교류전압**이라고 부른다.

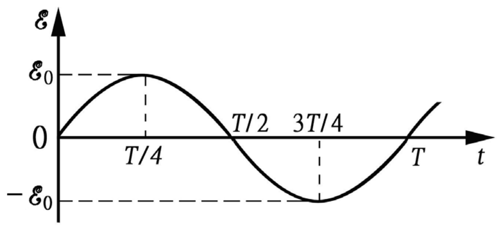


그림 4-21. 교류전동력

큰 출력을 내는 발전기들에서는 자석대신 전자석을 쓰며 닫긴회로를 돌리지 않고 전자석을 돌리는 방법으로 교류전압을 얻는다.(그림 4-22)

발전기의 축과 함께 도는 전자석을 **회전자**라고 부른다. 그리고 유도전동력이 생기는 닫긴회로는 발전기의 틀에 감겨져있는데 이것을 **전기자**라고 부른다.

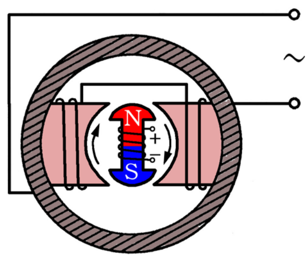


그림 4-22. 실제발전기의 원리적인 구조

발전기의 축을 돌리는데는 수력, 화력, 원자력, 풍력, 조수력, 지열 등의 각이한 에네르기들이 리용되며 이에 따라 발전소의 종류가 구별된다.

닫긴회로를 회전시켜 교류를 얻어내는 발전기에서는 얻어진 전기가 접촉고리와 솔을 통하여 나온다. 만일 발전기에서 얻어지는 전압이 높을 때에는 접촉고리와 솔사이의 마찰과정에 불꽃방전이 일어나며 이것들이 못쓰게 된다. 그리고 닫긴회로의 권회수를 크게 하는데도 제한을 받으므로 이런 형식의 발전기로는 500V이상의 교류전압을 얻어낼수 없다.

그러므로 수천~수만V의 높은 전압과 수십만kW의 전력을 생산하는 발전기들은 닫긴회로를 고정하고 전자석을 돌려주는 방식으로 제작된다.

교 류

교류발전기의 출구단자에 저항 R를 련결하고 닫긴회로를 이루면 회로에 전류가 흐른다. 교류발전기의 내부저항을 무시하면 전류의 세기는

$$i=\frac{\mathscr{E}}{R}=\frac{\mathscr{E}_0}{R}\sin\omega t$$

로 된다. 여기서 $i_0=\frac{\mathscr{E}_0}{R}$ 으로 표시하면 전류의 세기는

$$i=i_0\sin\omega t \quad \text{교류전류의 세기}$$

로 된다. 이처럼 회로에 흐르는 전류의 세기는 시간에 따라 시누스모양으로 변한다.

즉 전류의 세기와 방향이 시간에 따라 주기적으로 변한다.

이처럼 전류의 세기와 방향이 주기적으로 변하는 전류를 **교류**라고 부른다.

그리고 시누스모양으로 변하는 교류를 **시누스교류**라고 부른다.

학교와 가정, 일터들에서는 시누스교류를 리용한다.

교류에는 전압과 전류가 시누스모양으로 변하지 않고 각이한 모양을 가지고 변하는것들도 있다.(그림 4-23) 이와 같은 모양으로 변하는 교류를 **비시누스교류**라고 부른다.



그림 4-23. 비시누스교류

비시누스교류들은 전자회로를 리용하여 얻으며 TV나 콤퓨터, 록화기를 비롯한 전자기구들의 동작에서 중요한 작용을 한다.

문 제

1. 영구자석의 자기마당이 B=1.4T이고 선륜의 자름면적이 $S=5\text{cm}^2$, 권회수가 $N=30$인 교류발전기가 있다. 선륜이 1s당 60회로 돌 때 생기는 전동력의 최대크기는 얼마인가?
2. 그림 4-24와 같이 표시되는 교류전압이 있다. 이 교류전압의 표현식을 써보아라.
3. 어떤 발전기가 내는 교류전압의 최대값은 400V이고 발전기의 회전주파수는 60Hz이다. 교류전압의 표현식을 써보아라.

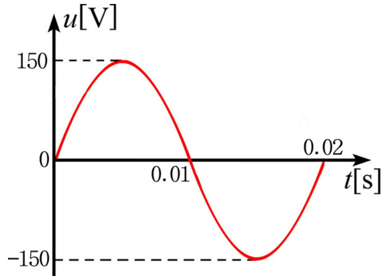


그림 4-24

제 5 절. 교류의 실효값

직류와 달리 교류는 전압과 전류의 세기가 시간에 따라서 변한다. 그러면 이와 같은 교류를 어떻게 표시하겠는가.

교류를 특징짓는 량들

시누스모양으로 변하는 교류전압과 전류의 세기는 각각 $\mathscr{E}=\mathscr{E}_0\sin\omega t$, $i=i_0\sin\omega t$로 표시된다. 여기서 $\mathscr{E}_0$과 i_0은 각각 교류전압과 전류세기의 최대값으로서 **교류의 진폭**이라고 부른다.

교류전압의 진폭은 $\mathscr{E}_0=NBS\omega$로서 주어진 발전기에 대해서는 발전기축을 돌리는 속도에 따라 달라진다.

발전기의 회전자가 한바퀴 도는데 걸린 시간 즉 교류전압과 전류가 완전히 한번 변하는데 걸리는 시간을 **교류의 주기**라고 부른다.

주기는 T로 표시하며 그의 단위는 1s이다.

회전자가 각속도 ω로 회전할 때 나오는 교류의 주기는

$$T=\frac{2\pi}{\omega} \qquad \textbf{교류의 주기}$$

이다. 회전자가 1s동안에 돌아간 회수 즉 교류가 1s동안에 진동하는 수를 교류의 **주파수**라고 부른다. 주파수는 f로 표시하며 그의 단위는 s^{-1} 또는 1Hz(헤르쯔)이다. 따라서 주파수는

$$f=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi} \qquad \textbf{교류의 주파수}$$

로 표시된다. 우리 나라에서 동력으로 쓰는 교류의 주파수는 60Hz이며 일부 나라들에서는 50Hz의 교류도 리용한다.

교류의 실효값

교류전압과 전류의 세기가 시시각각으로 변하여도 우리는 교류전압 220V, 교류 0.5A라는 말을 쓴다. 그리고 교류의 전압과 전류의 세기를 재는 전압계나 전류계도 일정한 크기만을 나타낸다.

❓ 그러면 교류전압과 전류의 세기를 나타내는 값들은 어느 순간의 값들인가.

사실 교류는 부단히 변하므로 임의의 순간에 그의 크기를 지적하기 불편하다.

교류에는 진폭이 큰것도 있고 작은것도 있으며 빨리 변하는것도 있고 천천히 변하는것도 있다. 이처럼 각이한 교류들의 크기를 표시하기 위하여 교류와 직류가 저항에서 내는 열량을 비교하는 방법을 리용한다.

두개의 꼭같은 저항에 교류와 직류를 통과시킬 때 같은 시간동안에 두 저항에서 같은 열량이 나오면 이 직류의 세기로써 교류의 세기를 표시한다.

동일한 저항에서 같은 시간동안에 교류와 꼭같은 열량을 내는 직류의 값을 **교류의 실효값**이라고 부른다.

❓ 교류의 실효값은 어떻게 표시되는가.

그림 4-25에서처럼 $u=u_0\sin\omega t$의 교류전압을 내는 전원에 저항 R를 련결하면 회로에는 $i=i_0\sin\omega t$의 교류가 흐르게 된다.

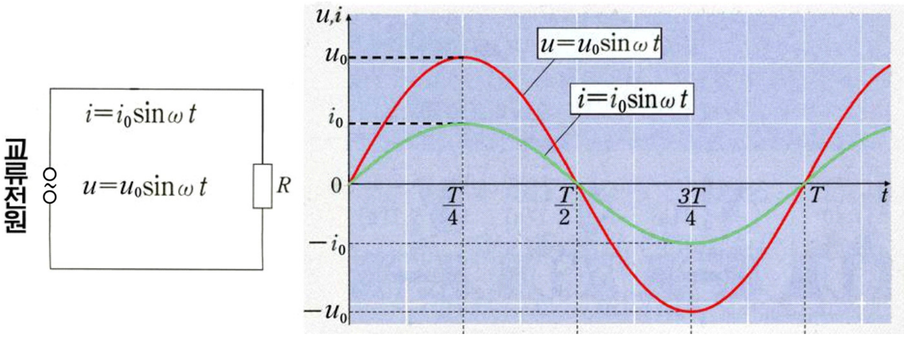


그림 4-25. 교류전압과 교류전류의 세기

이때 저항 R에서 교류의 한주기동안에 나오는 열량은 다음과 같다.

$$Q = i^2 RT = i_0^2 \sin^2 \omega t \cdot RT$$

보다싶이 전류의 세기가 시간에 따라 변하므로 저항에서 나오는 열량도 이에 따라 변한다.

그러므로 교류가 T 시간동안에 내는 열량을 계산하려면 전류세기의 두제곱의 평균값을 구하여야 한다. R와 T는 일정하므로 $i_0^2 \sin^2 \omega t$의 한주기평균값을 그라프를 가지고 구해보자.(그림 4-26)

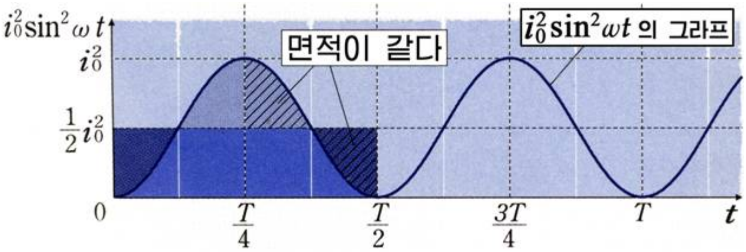


그림 4-26. 교류의 모양과 실효값의 계산

$i_0^2 \sin^2 \omega t$의 그라프는 항상 정의 값을 가진다. 이 그라프의 최대값 i_0^2의 절반되는 높이에서 수평으로 직선을 그으면 그림에서 빗선을 친 부분들의 면적이 꼭같게 된다.

그러므로 우의 면적을 아래면적에 채우는 방법으로 $i_0^2 \sin^2 \omega t$의 평균값을 구하면

$$\overline{i_0^2 \sin^2 \omega t} = \frac{i_0^2}{2}$$

로 된다.

따라서 한주기동안에 나오는 열량은 다음과 같다.

$$Q = \frac{i_0^2}{2} RT$$

한편 이 저항에 전류의 세기가 I인 직류가 흘러 T시간동안에 Q만 한 열량을 냈다면 다음 식이 성립한다.

$$Q = I^2 RT$$

이 직류의 세기가 바로 교류의 세기 $i_0^2 \sin \omega t$의 실효값이다.

우의 두 식으로부터 교류의 세기의 실효값은

$$I = \frac{i_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707 i_0 \qquad \text{교류의 세기의 실효값}$$

이처럼 교류의 세기의 실효값은 최대값의 $1/\sqrt{2}$배이다.

그리고 교류전압의 실효값도 최대값의 $1/\sqrt{2}$배이다.

$$U = \frac{u_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707 u_0 \qquad \text{교류전압의 실효값}$$

우리가 리용하는 교류전압의 실효값은 220V이다. 따라서 실지에 있어서는 $u_0 = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \times 220 \approx 311$ (V)의 높은 전압(최대값)도 순간순간 들어온다.

교류회로에서 전압계나 전류계가 가리키는 값들도 다 실효값들이다.

문 제

1. 저항이 500Ω인 저항에 교류를 통과시키니 2h 30min사이에 10^4 J의 열량이 나왔다. 이 교류의 실효값과 최대값을 구하여라.
2. $i = 10\sin 314t$ [A]로 표시되는 교류가 있다. 이 교류의 최대값, 실효값, 주기, 주파수를 구하여라.
3. 어떤 전열기에 10V의 직류전압을 걸어주었을 때 소비전력이 P였다. 이 전열기에 교류전압을 걸어주니 소비전력이 $P/4$로 되였다. 이 교류전압의 최대값을 구하여라.

제 6 절. 자체유도현상

자체유도현상은 전자기유도현상의 한 형태이다. 이 현상은 TV를 비롯하여 여러가지 전기기구들에 리용된다.

자체유도현상

전자기유도현상은 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 변할 때 닫긴회로에 유도전류가 흐르는 현상이다. 닫긴회로에 흐르는 전류가 변할 때 그가 만드는 변하는 자기마당에 의하여 그 회로자체에 유도전류가 생기지 않겠는가고 생각할수 있다. 이것을 실험으로 밝혀보자.

실 험

○ 그림 4-27과 같이 꼭같은 두 전등을 자체유도결수가 큰 선륜(례를 들어 형광등한류기)과 가변저항기에 이어 전원에 병렬로 련결한다.

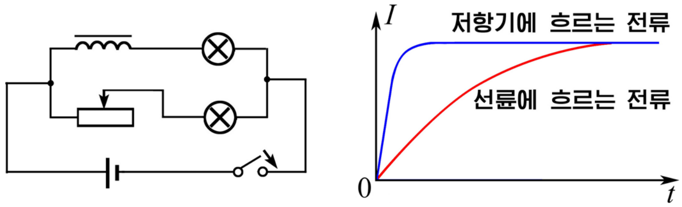


그림 4-27. 회로를 닫을 때의 자체유도현상

○ 스위치를 닫고 두 전등의 밝기가 같아지도록 가변저항기를 조절한다.

○ 스위치를 열었다가 다시 닫으면서 어느 전등이 먼저 밝아지는가를 살펴본다.

가변저항기에 련결된 전등이 먼저 밝아지고 선륜에 련결된 전등이 서서히 밝아진다.

왜 두 전등이 켜지는 시간이 다르겠는가.

스위치를 닫으면 전류의 세기는 령으로부터 어떤 일정한 값까지 증가한다.

이때 선륜에 흐르는 전류의 세기가 변하므로 선륜의 자름면을 지나는 자력선묶음이 변하며 전자기유도현상에 의하여 유도전동력이 크게 생긴다. 이 유도전동력은 선륜에 흐르는 전류의 변화를 방해하므로 선륜에 흐르는 전류가 서서히 증가되면서 선륜에 련결된 전등이 늦게 켜지게 되는것이다.

이와 같이 전기회로에 흐르는 전류가 변할 때 그 회로를 지나는 자력선묶음이 변하므로 회로자체에 유도전동력이 생기는 현상을 **자체유도**현상이라고 부른다.

자체유도현상은 전기회로에 흐르는 전류의 변화에 의하여 그 회로자체에서 일어나는 전자기유도현상이다.

자체유도현상때 생기는 유도전류와 유도전동력을 각각 **자체유도전류, 자체유도전동력**이라고 부른다.

※ 자체유도현상은 1839년 물리학자 헨리에 의하여 발견되였다.

자체유도현상은 전기회로를 끊을 때에도 생긴다.

실험

○ 그림 4-28과 같이 한류기와 네온등을 병렬로 전원(6V정도)에 련결한다.

○ 스위치 K를 닫고 네온등이 켜지는가를 관찰한다. 네온등이 켜지지 않는다.

○ 스위치를 여는 순간 네온등이 켜지는가를 본다. 네온등이 순간적으로 밝게 켜진다.

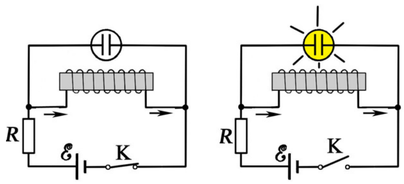


그림 4-28. 회로를 열 때의 자체유도현상

왜 그런가.

이것은 선륜에 흐르던 전류가 스위치를 열 때 갑자기 작아지므로 선륜에서 전류의 변화를 방해하는 방향으로 큰 자체유도전동력이 생기여 유도전류가 전등을 따라서 흐르기때문이다.

전기회로에 전원을 련결하고 스위치를 닫거나 열 때 회로에 흐르는 전류는 자체유도전동력으로 하여 순간적으로 령으로부터 정상값으로 증가하지 못하고 서서히 증가되며 또 순간적으로 령으로 되지 못한다.(그림 4-29)

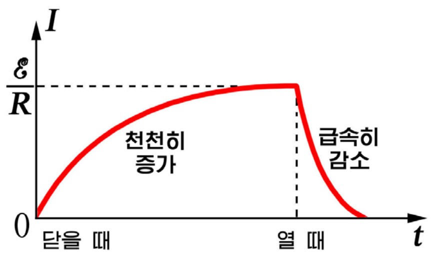


그림 4-29. 전기회로를 닫거나 열 때 흐르는 전류

자체유도전동력의 크기와 방향은 어떻게 되겠는가.

전자기유도현상때 생기는 유도전동력의 크기는 자력선묶음의 변화속도에 비례하고 방향은 자력선묶음의 변화를 방해하는 방향으로 향한다.

그런데 전기회로에 전류가 흐르면서 만드는 자기마당의 자기유도 B는 전류의 세기 I에 비례하므로($B \sim I$) 닫긴회로를 지나는 자력선묶음 Φ는 전류의 세기 I에 비례한다.($\Phi \sim I$) 그러므로

$$\Phi = LI \qquad (1)$$

식 1에서 비례결수 L을 전기회로의 **자체유도결수**라고 부른다.

자체유도결수는 전류의 세기가 1A인 전류가 흐르는 닫긴회로면을 지나는 자력선묶음과 크기가 같은 량이다.

자체유도결수의 단위는 1H(**헨리**)이다. 1H는 1A의 전류가 흐를 때 1Wb의 자력선묶음이 지나는 전기회로의 자체유도결수와 같다.

$$1\text{H}=1\text{Wb/A}$$

그러므로 자체유도전동력은 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \textbf{자체유도전동력} \qquad (2)$$

여기서 $\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$는 전류의 변화속도이고 -부호는 자체유도전동력이 전류의 변화를 방해하는 방향으로 생긴다는것을 의미한다.

그러므로 자체유도전동력은 회로의 자체유도결수와 전류의 변화속도에 비례하며 전류의 변화를 방해하는 방향으로 생긴다.

※ 자체유도결수의 단위 1H를 자체유도전동력에 의하여 다음과 같이 정하기도 한다.

1H는 전류의 세기가 1s동안에 1A씩 변할 때 1V의 자체유도전동력이 생기는 전기회로의 자체유도결수와 같다.

$$1\text{H} = \frac{1\text{V}\cdot\text{s}}{1\text{A}}$$

큰 변압기나 전동기가 들어있는 회로에서는 스위치를 여는 순간에 큰 유도전동력이 생기여 스위치의 두 극사이에 걸리므로 센 불꽃이 튈수 있다.

그러므로 큰 변압기나 전동기의 스위치는 절연성이 좋고 저항이 큰 기름속에 넣는다.

선륜의 자체유도결수

선륜의 자체유도결수는 무엇에 관계되겠는가.(그림 4-30)

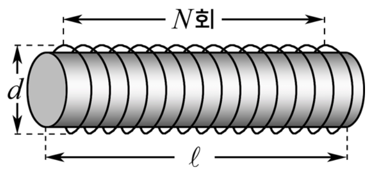


그림 4-30. 전기회로의 자체유도결수는 무엇에 관계되는가

길이가 ℓ, 자름면적이 S, 권회수가 N인 선륜의 자체유도결수를 구하자.

선륜에 전류가 흐를 때 선륜속에서 자기유도 B는 전류의 세기 I와 단위길이당 권회수 $n=\dfrac{N}{\ell}$에 비례한다.

$$B=\mu_0\frac{N}{\ell}I=\mu_0 nI$$

한편 선륜을 지나는 자력선묶음 Φ는 선륜의 권회수 N과 선륜속의 자기유도 B, 선륜의 자름면적 S에 비례한다.

$$\Phi=NBS$$

그러므로 선륜의 자체유도결수 L은 다음과 같다.

$$L=\frac{\Phi}{I}=\mu_0\frac{N^2}{\ell}S=\mu_0 n^2 V \qquad \text{선륜의 자체유도결수} \tag{3}$$

여기서 $V=S\ell$은 선륜의 체적이다.

선륜의 자체유도결수는 단위길이당 권회수의 두제곱과 선륜의 체적에 비례한다.

선륜속에 철심을 넣으면 선륜의 자체유도결수는 철심의 투자률배로 커진다.

$$L=\mu_0\mu n^2V=\mu_0\mu\frac{N^2}{\ell}S \tag{4}$$

참고 선륜에서 자체유도결수의 역할

전기회로에 흐르는 전류가 변할 때 생기는 자체유도전동력은 전류의 변화를 방해하는데 그의 크기는 선륜의 자체유도결수에 비례한다.

그러므로 선륜의 자체유도결수가 클수록 같은 시간동안에 생기는 전류의 변화는 작아진다. 이것은 력학에서 물체의 질량이 클수록 속도변화가 작은것과 류사하다. 그런데 물체의 질량은 그 물체가 가지는 관성의 크기를 나타내는 량이다. 따라서 선륜에서 자체유도결수는 전류에 대하여 《관성》의 역할을 한다.

이것을 운동법칙과 대비하면 다음과 같다.

$$\mathscr{E}=-L\frac{\Delta I}{\Delta t}, \qquad F=m\frac{\Delta v}{\Delta t}$$

즉 $I\leftrightarrow v$, $\mathscr{E}\leftrightarrow F$, $L\leftrightarrow m$이 대응된다.

문제

1. 무궤도전차와 궤도전차가 달릴 때 뽈대와 전기줄사이에서 센 불꽃이 튀는것을 볼수 있다. 왜 그런가?
2. 0.01s사이에 전류의 세기가 0.25A만큼 변할 때 500V의 자체유도전동력이 생기는 선륜의 자체유도결수는 얼마인가?

3. 자체유도전동력에 의하여 켜진 전등은 왜 오래 유지되지 못하는가?
4. 선륜에 2A의 전류가 흐를 때 선륜속을 지나는 자력선묶음이 10Wb이다. 자체유도결수는 얼마인가? 만일 선륜의 권회수를 2배로 하면 선륜속을 지나는 자력선묶음과 자체유도결수는 어떻게 되겠는가? 선륜의 길이는 변하지 않는다고 본다.

제 7 절. 호상유도현상과 변압기

변압기는 전자기유도현상의 한 형태인 호상유도현상을 리용한 기구이다.
변압기에 대하여 잘 알기 위하여 호상유도현상부터 보기로 하자.

호상유도현상

두개의 닫긴회로가 가까이에 있을 때 한 닫긴회로에 흐르는 전류가 변하면 그가 만드는 변하는 자기마당에 의하여 다른 닫긴회로에 유도전류가 흐르지 않겠는가고 생각할수 있다.

이것을 다음과 같은 실험으로 따져보자.

실험

○ 그림 4-31과 같이 실험기구를 설치한다.
○ 스위치를 닫는 순간 2차권선에 련결된 검류계의 눈금을 살펴본다. 바늘이 돌아간다.
○ 스위치를 닫고 잠시후 다시 검류계의 눈금을 살펴본다. 바늘이 움직이지 않는다.
○ 1차권선에 련결된 가변저항기의 저항을 변화시키면서 검류계의 눈금을 살펴본다. 바늘이 돌아간다.

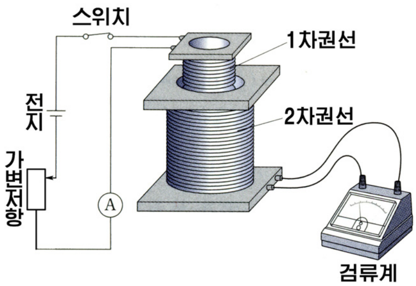


그림 4-31. 호상유도실험

실험으로부터 1차권선에 흐르는 전류가 변할 때 그가 만드는 변하는 자기마당에 의하여 2차권선에 유도전류가 흐른다는것을 알수 있다.

이와 같이 가까이에 있는 두 닫긴회로에서 첫째 닫긴회로에 흐르는 전류가 변할 때 그가 만드는 변하는 자력선묶음에 의하여 둘째 닫긴회로에 유도전류가 생기여 흐르는 현상을 **호상유도**현상이라고 부른다.

그리고 이때 생긴 유도전동력을 **호상유도전동력**이라고 부른다.

호상유도전동력의 크기는 어떻게 되겠는가.

호상유도현상은 전자기유도현상의 한 형태이므로 호상유도전동력의 크기는 닫긴 회로를 지나는 자력선묶음의 변화속도에 비례하며 자력선묶음의 변화를 방해하는 방향으로 향한다. 그러므로 자체유도전동력과 같은 형태로 표시할수 있다.

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -M\frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{호상유도전동력} \qquad (1)$$

식 1에서 비례결수 M을 **호상유도결수**라고 부른다.

호상유도결수는 첫째 닫긴회로에 흐르는 전류가 1s동안에 1A씩 변할 때 둘째 닫긴회로에 생기는 호상유도전동력과 크기가 같은 량이다.

호상유도결수의 단위는 1H이다. 1H는 첫째 닫긴회로에 흐르는 전류가 1s동안에 1A씩 변할 때 둘째 닫긴회로에 1V의 호상유도전동력이 생기는 호상유도결수와 같다.

호상유도결수는 두 닫긴회로의 크기와 모양, 호상배치, 주위매질에 관계된다.

이러한 호상유도현상은 변압기에 중요하게 리용된다.

변 압 기

호상유도현상을 리용하여 교류전압을 변화시키는 기구를 **변압기**라고 부른다. (그림 4-32)

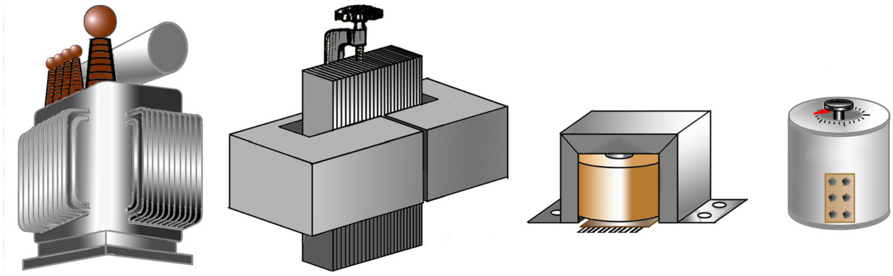


그림 4-32. 여러가지 변압기모양

변압기의 일반적구조를 보면 닫긴 철심과 전원에 련결하는 1차권선, 부하에 련결하는 2차권선으로 되여있다.

※ 변압기의 철심을 닫기게 하는것은 1차권선에 흐르는 교류가 만드는 변하는 자력선묶음이 모두 2차권선의 자름면을 지나게 하기 위해서이다.

❓ 변압기는 어떻게 교류전압을 변화시키는가.

변압기의 1차권선을 교류전원에 련결하면 1차권선에 의하여 생기는 주기적으로 변하는 자력선묶음이 철심을 통하여 닫긴다. 그러므로 이 자력선묶음이 2차권선의 자름면을 지나면서 유도전동력을 발생시킨다. (그림 4-33) 이때 1차권선과 2차권선을 지나는 자력선묶음의 변화속도는 같다.

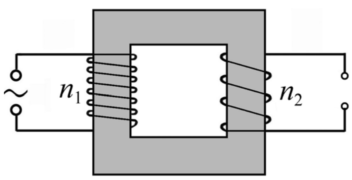


그림 4-33. 변압기의 원리

1차권선과 2차권선의 권회수를 n_1, n_2이라고 하면 1차권선에 생기는 유도전동력은 $\mathscr{E}_1 = n_1\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$이므로 1차권선의 저항을 무시하면 1차권선의 단자전압은 $U_1 = \mathscr{E}_1$이다.

마찬가지로 2차권선의 권회수를 n_2이라고 하면 2차권선에 생기는 유도전동력은 $\mathscr{E}_2 = n_2 \dfrac{\Delta \Phi}{\Delta t}$이고 2차권선의 단자전압은 $U_2 = \mathscr{E}_2$이다.

이상의 내용을 종합하면 변압기의 단자전압과 권회수사이에는 다음의 식이 성립한다.

$$\frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = k \quad \text{변압기단자전압과 권회수사이 관계} \qquad (2)$$

변압기에서 권선의 단자전압은 권회수에 비례한다.

즉 변압기에서 권회수가 많을수록 단자전압이 높다. 그러므로 2차권선의 권회수를 조절하면 요구하는 전압을 얻을수 있다.

변압기에서 1차권선의 단자전압(1차전압)이 2차권선의 단자전압(2차전압)보다 몇배나 높은가 또는 낮은가를 표시하는 값 k를 **변압비**라고 부른다.

$k > 1$이면 전압을 낮추는 **낮춤변압기**이고 $k < 1$이면 전압을 높이는 **높임변압기**이다.

? 변압기권선의 단자전압과 전류의 세기사이에는 어떤 관계가 있겠는가.

변압기의 1차 및 2차권선에 흐르는 전류의 세기를 I_1, I_2이라고 하자.

변압기의 1차권선이 받아들이는 전력은 $P_1 = U_1 I_1$이고 2차권선이 부하에 공급하는 전력은 $P_2 = U_2 I_2$이다. 변압기에서 전력손실을 무시하면 1차전력과 2차전력은 같다.(그림 4-34)

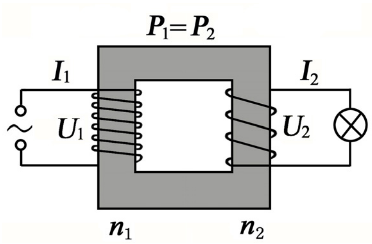


그림 4-34. 변압기의 1차전력과 2차전력은 같다

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad \text{변압기에서 1차, 2차전류사이 관계} \qquad (3)$$

참고 변압기의 효률

변압기에서는 전원에서 받은 전력을 모두 부하에 보내지 못한다. 그것은 변압기권선을 감은 동선의 저항으로 하여 쥴열이 발생되면서 전력이 일부 소비되며 또 철심의 가열로 인하여 전력이 일부 소비되기때문이다.

권선의 저항으로 하여 쥴열로 소비되는 전력을 동손실(P'), 철심의 가열로 소비되는 전력을 철손실(P'')이라고 한다. 변압기가 받아들이는 전력을 P_1, 부하에서 공급하는 전력을 P_2로 표시하면 $P_1 = P_2 + P' + P''$이다.

그러므로 변압기의 효률은 $\eta = \dfrac{P_2}{P_1} \times 100\%$와 같이 표시된다.

변압기효률은 보통 98%이상이다.

변압기의 1차 및 2차권선의 단자전압이 변하지 않을 때 1차권선에 흐르는 전류의 세기는 2차권선에 흐르는 전류의 세기에 비례한다. 다시말하여 2차권선에 부하를 많이 련결하여 전류의 세기가 커지는데 따라 1차권선에 흐르는 전류의 세기도 커진다.

한편 1차 및 2차권선에 흐르는 전류의 세기와 매 권선의 단자전압사이에는

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{U_2}{U_1} \tag{4}$$

과 같은 관계식이 성립된다. 즉 단자전압과 전류의 세기는 거꿀비례한다.

변압기를 어디에 리용하겠는가.

변압기는 전력수송을 비롯하여 가정과 공업의 많은 부문에서 리용한다.

전력수송에서 전력의 도중손실을 없애는데 변압기를 리용하는것을 보기로 하자.

전력 P를 전압 U로 저항이 R인 송전선을 통하여 보낸다면 송전선에서 쥴열로 소비되는 전력은 다음과 같다.

$$P_{손}=I^2R=\frac{P^2R}{U^2} \tag{5}$$

식 5에서 알수 있는것처럼 송전선에서 쥴열로 소비되는 전력의 도중손실은 U^2에 거꿀비례한다.

그러므로 전력의 도중손실을 줄이려면 송전전압을 높여 전력을 송전하며 소비지에서는 낮춤변압기로 전압을 낮추어 사용한다.(그림 4-35)

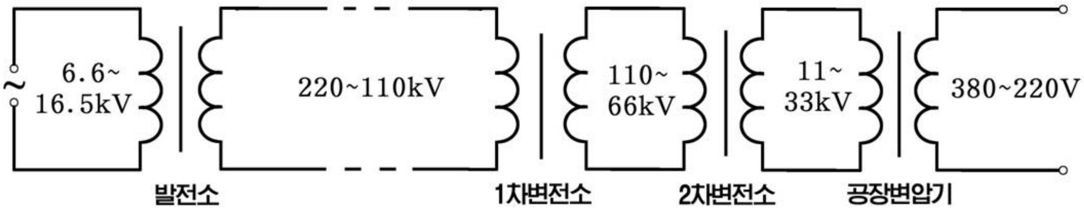


그림 4-35. 우리 나라 전력의 송배전

문 제

1. 1차 및 2차권선의 권회수가 1 000회, 500회인 변압기의 2차권선에 저항이 20Ω인 부하를 이었다. 1차권선에 최대값이 282V인 교류전압을 걸어주었다. 2차권선에 흐르는 전류의 세기, 1차권선에 흐르는 전류의 진폭은 얼마인가?
2. 낮춤변압기의 2차권선은 1차권선보다 굵은 도선으로 권회수도 적게 감는다. 왜 그렇게 하는가?

3. 어떤 단권변압기(권선이 1개인 변압기)는 1차전압이 220V인 때 2차전압을 250V까지 높일수 있도록 만들었다.(그림 4-36) 2차전압을 220V까지 보장하자면 1차전압(입구전원전압)이 몇V이상이여야 하는가? 1차권회수가 660인 때 170V의 전압에서도 220V까지 나오게 하자면 1차권선에 어떤 대책을 취해야 하는가?

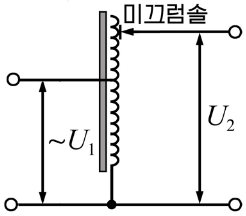


그림 4-36

4. 1차권선의 단자전압이 200V이고 2차권선의 단자전압이 6V인 때 2차권선에 3A의 전류가 흐르는 변압기가 있다. 1차권선에 흐르는 전류의 진폭은 얼마인가?

제 8 절. 회리전류와 표피효과

회리전류(푸코전류)

닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 변하면 유도전류가 닫긴회로에 흐른다.

❓ 변하는 자기마당속에 금속덩어리를 넣으면 금속덩어리를 지나는 자력선묶음이 변하므로 금속덩어리속에 유도전류가 생기지 않겠는가.

금속덩어리를 수많은 닫긴회로들의 모임으로 보면 이 닫긴회로들을 지나는 자력선묶음이 변할 때 유도전동력이 발생되여 유도전류가 흐를것이다.

이것을 실험으로 알아보자.

실 험

○ 실험용변압기의 철심짬에 그림 4-37과 같이 동판쪼각을 끼운다.

○ 변압기의 1차권선을 교류전원에 련결하고 교류를 흘려보낸다.

○ 잠시후 동판을 손으로 만져보게 하여 가열되였는가를 알아본다. 동판이 뜨거워진다.

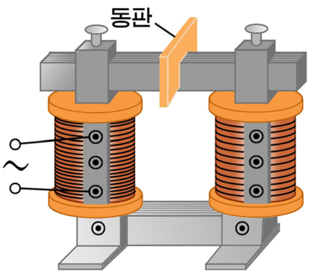


그림 4-37. 회리전류의 가열작용

❓ 동판이 왜 가열되겠는가.

동판이 가열된것은 동판을 지나는 변하는 자력선묶음에 의하여 동판에 유도전류가 흐르기때문이다.

즉 동판을 수많은 닫긴회로들의 모임으로 보면 자력선에 수직인 면을 따라 회리모양의 유도전류가 흐르는데 동판의 저항이 작으므로 큰 유도전류가 흐른 결과이다.

이와 같이 금속덩어리를 지나는 자력선묶음이 변할 때(금속덩어리가 변하는 자기마당속에 있을 때) 금속덩어리에 생긴 회리모양의 유도전류를 **회리전류** 또는 **푸코전류**라고 부른다.

푸코전류는 금속덩어리속에서 자력선에 수직인 면을 따라 흐르며 자기마당이 빨리 변할수록, 저항이 작은 도체일수록 세게 흐른다.(그림 4-38)

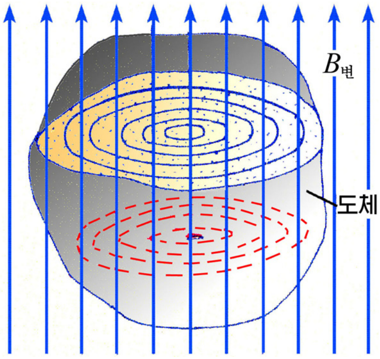


그림 4-38. 푸코전류

회리전류현상은 프랑스의 물리학자 푸코가 처음으로 발견하였다.

회리전류의 열작용. 금속덩어리를 지나는 자력선묶음이 빨리 변하고 금속덩어리의 저항이 작으므로 금속덩어리속에는 큰 푸코전류가 흐르면서 금속덩어리가 세게 가열된다. 이러한 작용이 회리전류의 열작용이다.

회리전류의 열작용을 유도로에서 금속을 열처리하거나 유색금속이나 특수합금을 녹이는데 리용한다.

※ 유도로는 회리전류의 열작용을 리용하여 금속을 녹이거나 가열하는 로이다.

자료 저주파유도로와 고주파유도로

유도로는 사용하는 교류의 주파수에 따라 저주파유도로와 고주파유도로로 나눈다.(그림 4-39) 저주파유도로는 60Hz 또는 그보다 낮은 주파수의 교류를 쓰는 유도로이다.

저주파유도로의 권선에 교류전류를 흐르게 하면 이 전류가 만드는 변하는 자력선묶음이 철심을 통하여 닫기므로 유도로속을 모두 지난다. 그러므로 로속의 금속덩어리들에 큰 회리전류가 생기여 많은 열이 나므로 금속이 녹는다. 저주파유도로는 주로 유색금속 및 저합금강을 녹이는데 리용한다.

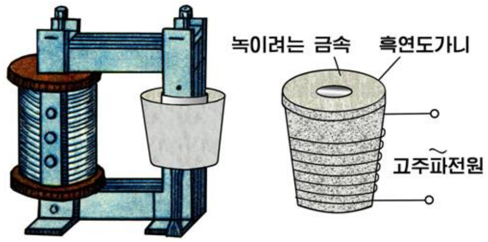


그림 4-39. 저주파유도로와 고주파유도로

고주파유도로는 주파수가 높은 교류(1 000~10 000Hz이상)를 쓰는 유도로이다.

고주파유도로에는 철심이 없으며 동관을 라선형으로 감아 선륜을 만들고 그속에 도가니를 설치한다. 선륜에 고주파전류를 흘려보내면 그것이 만드는 빠른 속도로 변하는 자력선묶음에 의하여 도가니속의 금속덩어리들에 큰 회리전류가 생겨 녹는다.

고주파유도로는 내산성, 고합금강, 특수합금을 녹이는데와 금속의 열처리에 리용한다.

회리전류의 열작용이 해로운 경우도 있다.

변압기나 전동기를 비롯하여 교류기계들과 기구들에 들어있는 철심은 회리전류에 의하여 가열되므로 못쓰게 되거나 전력이 랑비되게 된다.

그러므로 철심에 회리전류가 적게 생기게 하여야 한다.

이를 위하여 철심은 얇은 규소강판을 서로 절연시켜 규소강판의 면이 자력선에 평행으로 되게 쌓아서 만든다.(그림 4-40)

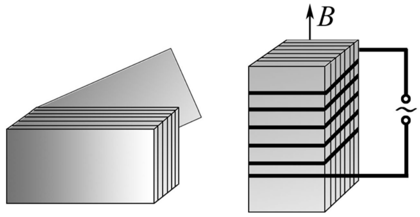


그림 4-40. 철심의 구조

※ 철심으로는 규소강판뿐아니라 다른 강자성체금속의 얇은 판을 리용할수도 있다.

회리전류의 제동작용. 회리전류는 금속덩어리에 생긴 유도전류이므로 불균일한 자기마당속에서 금속덩어리가 운동할 때 그의 운동을 방해한다.

례를 들어 불균일한 자기마당속에서 금속판이 운동할 때 금속판에 생긴 회리전류는 금속판의 운동을 방해한다.

이러한 회리전류의 작용을 **회리전류의 제동작용**이라고 부른다.

이것을 실험으로 알아보자.

실험

○ 그림 4-41과 같이 실험기구를 설치한다.

○ 전자석의 자극사이에 알루미니움판을 흔들이에 걸고 그것을 흔들어놓고 어떻게 진동하는가를 살펴본다.

○ 다음 권선을 직류전원에 련결하고 알루미니움판의 진동을 살펴본다.

○ 알루미니움판을 떼내고 머리빗살모양으로 째진 알루미니움판을 끼운 후 우와 같은 실험을 한다.

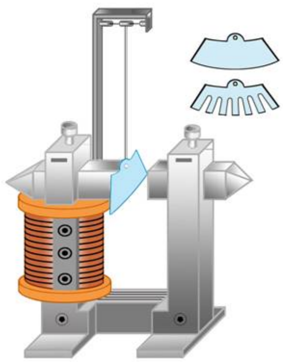


그림 4-41. 회리전류의 제동작용을 알아보는 실험

실험에서는 알루미니움판과 머리빗살모양으로 째진 알루미니움판을 같은 진폭으로 떨게 할 때 알루미니움판이 먼저 멎는것을 알수 있다.

이것은 자극사이로 알루미니움판과 머리빗살모양으로 짼 알루미니움판이 지나면서 자력선을 끊으므로 다같이 회리전류는 생기지만 알루미니움판에 생기는 회리전류가 더 커서 제동힘을 크게 받기때문이다.

이러한 회리전류의 제동작용은 전류계나 전압계 등 전기측정기구들의 바늘의 진동을 없애여 인차 해당한 값을 가리키도록 하는데 리용한다.(그림 4-42)

회리전류의 제동작용은 적산전력계와 자동차속도계 등 유도전동장치들에 리용한다.

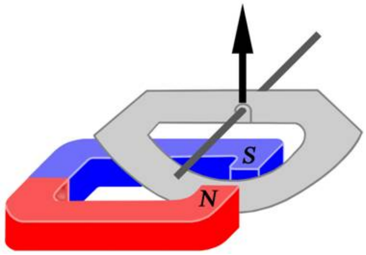


그림 4-42. 전류계에서의 바늘의 제동장치(전자기제동기)



고주파교류가 도선을 따라 흐를 때 어떤 현상이 나타나겠는가?

표피효과

전기줄에 교류 i가 흐른다고 하자. 전류 i가 커질 때 그가 만드는 자기유도 B도 커진다. 렌쯔의 규칙에 의하여 자기유도 B의 변화를 방해하는 방향으로 자기유도 B'가 생기도록 회리전류 i'가 흐른다.(그림 4-43)

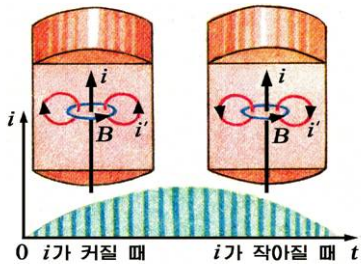


그림 4-43. 표피효과가 생기는 원인

전류 i가 증가할 때 전기줄의 중심부분에서는 i와 i'의 방향이 반대이고 겉면층에서는 같다. 그러므로 회리전류 i'는 겉면층에서는 i가 빨리 증가하게 하고 중심부분에서는 i의 증가를 방해한다. 따라서 교류전류는 겉면층에서 세게 흐르게 된다.

한편 교류전류 i가 감소할 때 중심부분에서는 i와 i'의 방향이 같고 겉면층에서는 반대이다. 그러므로 회리전류 i'는 겉면층에서는 i가 빨리 감소하게 하고 중심부분에서는 i의 감소를 방해한다. 따라서 교류전류는 겉면층에서 세게 흐르게 된다.

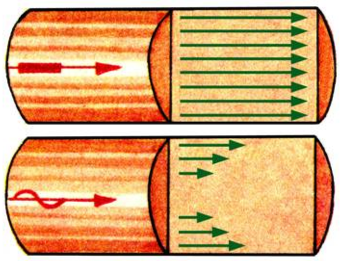


그림 4-44. 전기줄에 직류, 교류가 흐를 때 전류밀도

이와 같이 전기줄에 교류전류가 흐를 때 겉면층에 전류가 세게 흐르는 현상을 **표피효과**라고 부른다.

표피효과는 교류의 주파수가 클수록 더 잘 나타난다. 고주파전류는 거의 전기줄의 겉면층으로만 흐른다.(그림 4-44) 그러므로 고주파회로에서는 속이 빈 동관이나 사기관의 겉면에 은층을 입힌것을 도선으로 리용한다.

표피효과가 심하게 나타날 때 겉면층에 전류가 크게 흐르면서 열이 많이 발생하므로 겉면층만 심하게 가열된다. 이것을 리용하여 제품의 겉면열처리를 진행한다.

문제

1. 곧은 동막대기의 교류에 대한 저항은 직류에 대한 저항보다 크다. 왜 그런가?
2. 막힌 석영유리관속에 금속덩어리가 있다. 유리관을 가열하지 않고 금속덩어리를 녹이려면 어떻게 하면 되겠는가?
3. 자동차의 속도계는 그림 4-45와 같이 영구자석을 돌리면 금속원판이 따라 돌면서 속도를 가리키게 되여있다. 금속원판이 자석을 따라서 돌아가는 리유를 자력선을 그려 설명하여라.

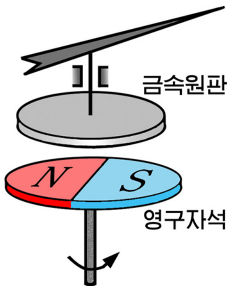


그림 4-45

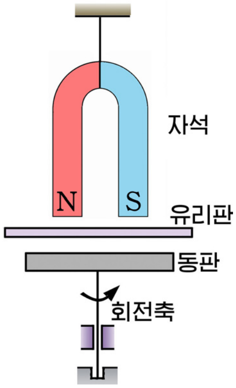


그림 4-46

4. 그림 4-46과 같이 말굽자석을 매달고 그밑에 회전축을 설치하였다. 회전축에 동판을 끼우고 회전축을 돌리면 자석도 함께 돌아간다. 그러나 동판대신에 염화비닐판을 끼우고 회전축을 돌리면 자석은 돌지 않는다. 왜 그런가? (여기서 유리판을 놓는것은 동판이나 염화비닐판을 돌릴 때 공기가 함께 돌면서 자석에 영향을 미치는것을 막기 위해서이다.)

제 9 절. 자기마당의 에네르기

전기마당이 에네르기를 가지는것처럼 자기마당도 에네르기를 가지지 않겠는가. 이것을 선륜에 전류가 흐를 때 만들어지는 자기마당을 따지여 알아보도록 하자.

선륜속의 자기마당의 에네르기

그림 4-47과 같이 선륜과 네온등에 이은 전지를 떼여도 네온등에는 얼마동안 불이 켜져있다.

? 스위치를 뗀 후에 네온등을 켜주는 에네르기는 어디서 온것인가.

네온등에 불이 켜지게 흐르는 전류는 선륜에 생기는 자체유도전동력에 의한것이다.

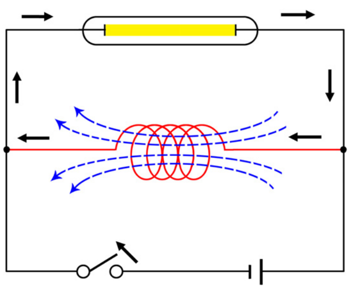


그림 4-47. 스위치를 연 후에 네온등을 켜주는 에네르기는 어디서 온것인가

그런데 자체유도전동력은 선륜을 지나던 자기마당이 없어지면서 생긴것이다. 그러므로 네온등에 불이 얼마동안 켜지게 하는 에네르기는 선륜의 자기마당에 의하여 생긴것이 명백하다.

한편 저항이 R인 선륜에 전원을 련결하여 전압 U를 걸어줄 때 선륜에 흐르는 전류는 선륜에 생기는 자체유도전동력에 의하여 인차 $I=\dfrac{U}{R}$값에 도달되지 못한다.

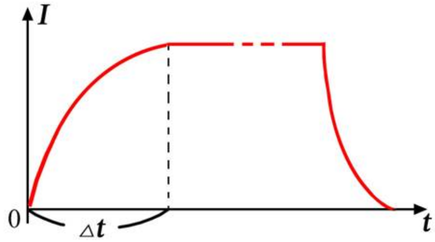


그림 4-48. 선륜에 전지를 이을 때와 뗄 때 전류의 변화

이것은 전원이 선륜에 공급하는 전기에네르기의 일부가 선륜에서 자기마당을 만드는데 쓰이기때문이다.(그림 4-48)

이러한 사실을 통하여 선륜에서 자기마당은 에네르기를 가진다는것을 알수 있다.

❓ 선륜에 생기는 자기마당은 얼마만한 에네르기를 가지겠는가.

저항 R를 가지는 선륜을 전동력이 $\mathcal{E}$인 전원과 련결하자.

이때 선륜에 흐르는 전류는 령으로부터 점차 커지게 된다. 전류가 I인 순간으로부터 짧은 시간 Δt동안에 전동력이 $\mathcal{E}$인 전원이 하는 일은 $A=\mathcal{E}I\cdot\Delta t$이다.

전원이 하는 일은 Δt시간동안에 선륜에 생기는 자기마당의 에네르기 ΔW와 저항 R에서 쥴열 $Q=I^2R\cdot\Delta t$로 쓰이므로 에네르기보존법칙에 의하여 이것들의 합과 같다.

$$A=\Delta W+Q \qquad (1)$$

이로부터 선륜에 생긴 자기마당의 에네르기는

$$\Delta W=A-Q=I\cdot\Delta t(\mathcal{E}-IR) \qquad (2)$$

한편 닫긴회로의 옴의 법칙을 적용하면

$$IR=\mathcal{E}+\mathcal{E}_{자} \qquad (3)$$

식 3에서 $\mathcal{E}_{자}$는 선륜에 생기는 자체유도전동력

$$\mathcal{E}_{자}=-L\cdot\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

이다.

식 2에 식 3을 넣고 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\Delta W=I\cdot\Delta t(\mathcal{E}-\mathcal{E}-\mathcal{E}_{자})=-\mathcal{E}_{자}\cdot I\cdot\Delta t=LI\cdot\Delta I \qquad (4)$$

전류 I에 따르는 LI의 변화그라프를 그리면 이 그라프에서 선륜에 생기는 자기마당의 에네르기 ΔW는 LI와 ΔI를 두 변으로 하는 직4각형 abcd의 면적과 크기가 같다.(그림 4-49)

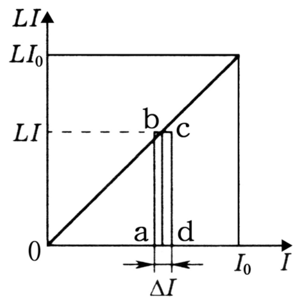


그림 4-49. 전류 I에 따르는 LI의 그라프

전류가 령으로부터 I_0 까지 증가될 때 선륜에 생기는 자기마당의 에네르기(W)는 I_0과 LI_0을 두 직각변으로 하는 직3각형의 면적과 크기가 같다.

따라서 전류 I_0이 흐를 때 선륜에 생긴 자기마당의 에네르기는 다음과 같다.

$$W=\frac{1}{2}LI_0^2 \quad \text{선륜의 자기마당의 에네르기} \qquad (5)$$

전류가 만드는 자기마당의 에네르기는 선륜의 자체유도결수와 전류세기의 두제곱에 비례한다.

식 5는 물체의 운동에네르기를 표시하는 식 $K=\frac{1}{2}mv^2$과 같은 모양을 가진다.

여기서 전류의 세기 I_0은 물체의 속도 v에 대응되고 선륜의 자체유도결수 L은 물체의 질량 m에 대응된다.

물체의 질량 m이 클수록 물체의 관성이 큰것처럼 선륜의 자체유도결수 L이 클수록 거기에 흐르는 전류의 관성이 크다.

자기마당의 에네르기밀도

전류가 만드는 자기마당의 에네르기크기에 의해서는 자기마당이 센가 약한가를 정확히 따질수 없다.

그것은 자기마당의 에네르기가 자기마당이 차지하는 체적에도 관계되기때문이다.

이것을 그속에 자기마당이 집중되여있고 균일하다고 볼수 있는 긴 선륜에서 따져보기로 하자.

선륜속에서 자기마당의 자기유도는 $B=\mu_0 nI$ 이고 선륜의 자체유도결수는 $L=\mu_0 n^2 V$ 이므로 자기마당의 에네르기는 다음과 같다.

$$W=\frac{1}{2}LI^2=\frac{1}{2}\mu_0 n^2 V I^2=\frac{1}{2\mu_0}B^2 V \qquad (6)$$

식 6에서 보는바와 같이 자기마당의 에네르기는 그것이 차지하는 체적에도 관계된다.

그러므로 단위체적의 자기마당의 에네르기와 크기가 같은 량인 자기마당의 에네르기밀도는 다음과 같다.

$$w=\frac{W}{V}=\frac{1}{2\mu_0}B^2 \quad \text{자기마당의 에네르기밀도} \qquad (7)$$

자기마당의 에네르기밀도는 자기유도의 두제곱에 비례한다.(그림 4-50)

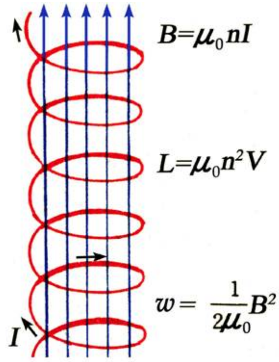


그림 4-50. 선륜의 자기마당의 에네르기밀도

고른자기마당속에서는 B가 일정하므로 자기마당의 에네르기밀도 w는 자리에 관계되지 않는다.

그러나 고르지 않은 자기마당에서 에네르기밀도 w는 자리에 따라 다르다.

그러므로 고르지 않은 자기마당에서는 자기마당의 에네르기를 마당이 고르다고 볼수 있는 요소체적의 자기마당의 에네르기를 구하여 이것들의 합을 구하는 방법으로 구한다.

문 제

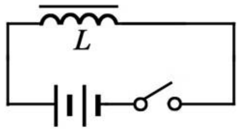


그림 4-51

1. 그림 4-51과 같이 전원에 선륜을 이은 다음 스위치를 열면 열리는 순간에 접점사이에 센 불꽃이 튄다. 이것을 자기마당의 에네르기로 설명하여라.
2. 유도결수가 0.15H이고 저항이 매우 작은 선륜에 4A의 전류가 흐르고있다. 이 선륜에 큰 저항을 병렬로 련결한 다음 전원을 끊었다. 전원을 끊은 다음에 저항에서 나오는 열량은 얼마인가?
3. 선륜의 자기마당과 축전기의 전기마당을 대비한 표에서 빈칸에 알맞는 식과 글을 써넣어라.

선륜의 자기마당의 에네르기 $W=\frac{1}{2}LI^2$	축전기의 전기마당의 에네르기 □
긴 선륜의 유도결수 $L=\mu_0\frac{N^2}{\ell}S$	평판축전기의 전기용량 □
□의 자기마당의 자기유도 $B=\mu_0\frac{N}{\ell}I$	평판축전기의 전기마당의 세기 □
□의 자기마당의 에네르기 $W=\frac{1}{2\mu_0}B^2V$	평판축전기의 전기마당의 에네르기 □
□의 에네르기밀도 $w=\frac{1}{2\mu_0}B^2$	전기마당의 에네르기밀도 □

탐구

문제: 실제발전기의 구조를 알아보고 동작원리를 해명하여라.

방향: · 실제발전기의 그림 또는 사진을 관찰하면서 그의 구조를 알아보아라.

· 타빈(또는 수차)이 회전할 때 회전자에 전류가 어떻게 공급되며 그것이 전자석으로 되는가를 따져보아라.

· 전기자에 어떻게 전동력이 생기는가를 알아보아라.

복습문제

1. 그림 4-52에서 직선도선 L에 화살표방향으로 일정한 전류 I 가 흐른다. 이것과 한 평면내에 있는 닫긴회로 abcd가 다음과 같이 움직인다. 아래의 운동과정에서 닫긴회로에 유도전류가 흐르는 경우를 선택하여라.

   ㄱ) 닫긴회로가 종이면우에서 오른쪽으로 평행이동한다.

   ㄴ) 닫긴회로가 종이면우에서 아래로 평행이동한다.

   ㄷ) 닫긴회로가 종이면우에서 왼쪽으로 평행이동한다.

   ㄹ) 닫긴회로가 종이면우에서 우로 평행이동한다.

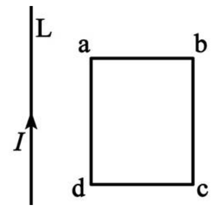


그림 4-52

2. B=20T의 자기마당속에서 S=10cm^{2}인 닫긴회로면이 자력선에 수직인 방향으로부터 평행인 방향으로 회전하였다. 자력선묶음의 변화는 얼마인가?

   (답. -2×10^{-2} Wb)

3. 그림 4-53에서 다음의 경우에 대하여 지북침의 N극이 가리키는 방향을 지적하여라.

   ㄱ) 스위치 K를 닫을 때

   ㄴ) 스위치 K를 닫아놓고있을 때

   ㄷ) 스위치 K를 닫고 가변저항기로 전류의 세기를 크게 할 때

   ㄹ) 스위치 K를 뗄 때

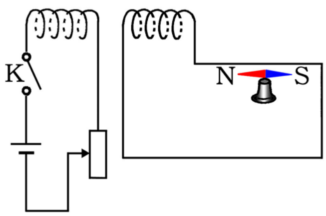


그림 4-53

4. 그림 4-54에서처럼 직선도선 AB에 화살표방향으로 일정한 전류가 흐른다. 이와 한 평면내에 바른4각형회로 abcd가 평행으로 놓여있다. 회로가 M위치에서 그와 대칭인 M′위치로 등속으로 이동할 때 여기에 생기는 유도전류는 다음과 같이 흐른다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

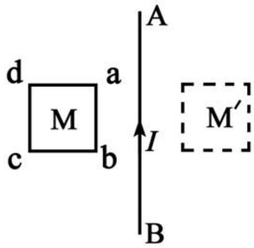


그림 4-54

ㄱ) 먼저 abcd방향으로 흐르고 다음 adcb방향으로 흐른다.

ㄴ) 먼저 adcb방향으로 흐르고 다음 abcd방향으로 흐른다.

ㄷ) 먼저 abcd방향으로 흐르고 다음 adcb방향으로 흐르며 마지막에는 abcd방향으로 흐른다.

ㄹ) 먼저 adcb방향으로 흐르고 다음 abcd방향으로 흐르며 마지막에는 adcb방향으로 흐른다.

5. 그림 4-55에서처럼 매끄러운 절연막대기우에 두개의 도선고리가 걸려있다. 막대기자석을 그림처럼 왼쪽으로 고리들에 들이밀 때 두 고리는 어떻게 되겠는가? 정확한 표현을 선택하여라.

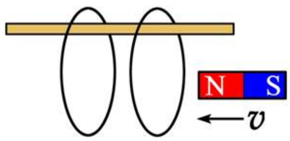


그림 4-55

ㄱ) 동시에 오른쪽으로 이동하면서 두 고리사이의 간격은 커진다.

ㄴ) 동시에 오른쪽으로 이동하면서 두 고리사이의 간격은 작아진다.

ㄷ) 동시에 왼쪽으로 이동하면서 두 고리사이의 간격은 작아진다.

ㄹ) 동시에 왼쪽으로 이동하면서 두 고리사이의 간격은 커진다.

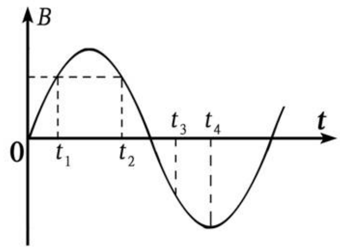


그림 4-56

6. 어떤 닫긴회로를 수직으로 지나는 자기마당이 시간에 따라 그림 4-56에서처럼 변한다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) t_1 와 t_2 순간에 닫긴회로로 흐르는 유도전류의 방향이 같다.

ㄴ) t_1 와 t_3 순간에 닫긴회로로 흐르는 유도전류의 방향이 같다.

ㄷ) t_2 과 t_3 순간에 닫긴회로로 흐르는 유도전류의 방향이 같다.

ㄹ) t_4 순간에 닫긴회로로 흐르는 전류의 세기가 령이다.

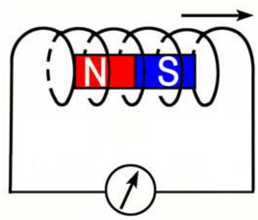


그림 4-57

7. 선륜속에서 자석을 뽑는 순간 선륜에 생기는 유도전류의 방향을 그림 4-57에 화살로 표시하여라.

8. 선륜 A에 전지를 잇는 순간에 선륜 B에 생기는 유도전류의 방향을 그림 4-58에 화살로 표시하여라.

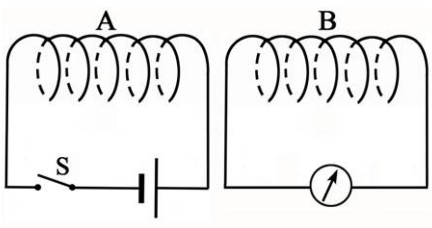


그림 4-58

9. 직선전류의 자기마당속에 직4각형회로 ABCD가 직선전류를 포함하는 면을 따라 직선전류로부터 멀어진다. 이때 닫긴회로에 생기는 유도전류의 방향을 결정하여라. 닫긴회로에 어떤 자기힘이 작용하는가?(그림 4-59)

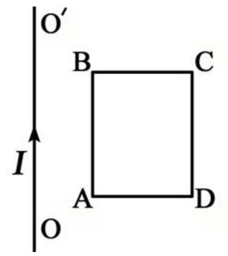


그림 4-59

10. 자석이 선륜의 축을 따라서 등속으로 운동하여 선륜의 속을 지나서 나간다. 그림 4-60의 ㄱ, ㄴ, ㄷ의 자리에서 선륜에 생기는 유도전류의 방향을 결정하여라. 자석은 선륜보다 짧다.

11. 권회수가 1 000회이고 자름면적이 4×10^{-4} m^{2}인 고리모양선륜이 자기유도가 7×10^{-2}T인 자기마당에 수직으로 놓여있다. 자기마당이 일정한 속도로 줄어들어 0.5 s사이에 자기유도가 2×10^{-2}T로 되였다. 선륜에 얼마만한 전동력이 생기겠는가? (답. 4×10^{-2} V)

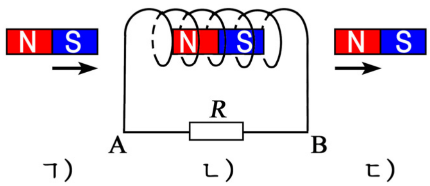


그림 4-60

12. 지구자기마당의 자력선에 수직인 방향으로 날고있는 비행기가 있다.(그림 4-61) 두 날개의 끝 M과 N사이에 걸리는 유도전동력을 구하여라. 지구자기마당의 자기유도는 B=4.5×10^{-5} T, 비행기속도의 자기마당에 대한 수직성분은 800km/h, MN의 길이는 40m이다.

(답. 0.4V)

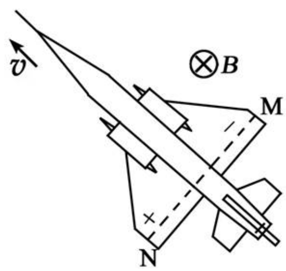


그림 4-61

13. 그림 4-62와 같이 xyz자리표계를 가지는 공간에 z축방향으로 향하는 자기마당이 놓여있다. 이 자기마당은 y, z에는 관계없고 x축방향으로 가면서 $B=bx$ (b는 정의 상수)에 따라 고르롭게 커진다. xy평면에 변의 길이가 a이고 저항이 R인 바른4각형회로가 외부힘을 받아 x축방향으로 v의 속도로 등속운동한다.

ㄱ) 닫긴회로에 생기는 유도전류의 크기와 방향을 구하여라.

ㄴ) 외부힘의 크기는 얼마인가?

(답. ㄱ) $\dfrac{va^2b}{R}$, ABCDA방향 ㄴ) $\dfrac{va^4b^2}{R}$)

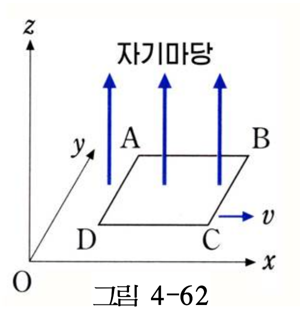


그림 4-62

14. 자름면적이 50cm^2, 권회수가 500회인 선륜을 수직으로 지나는 고른자기마당이 등속으로 커져서 그의 자기유도가 0.1s사이에 1.0×10^{-3}T로부터 4.0×10^{-3}T로 되였다. 이동안에 선륜에 생긴 유도전동력의 크기는 얼마인가?

(답. 75mV)

15. 자기유도가 0.4T인 자기마당속에서 권회수가 300회이고 저항이 40Ω, 자름면적이 16cm^{2}인 선륜의 축이 자기마당과 60°를 이루면서 놓여있다. 자기마당이 없어질 때 얼마만한 전기량이 흐르겠는가? (답. 2.4×10^{-3}C)

16. 자기유도가 0.1T인 자기마당속에 동으로 된 바른4각형회로가 놓여있다. 전기줄의 자름면적은 1mm^{2}이고 회로의 면적은 25cm^{2}이다. 그리고 회로면은 자기마당과 수직이다. 자기마당이 없어질 때 회로에 흐르는 전기량을 구하여라. 동의 비저항은 $\rho=1.7\times10^{-8}\Omega\cdot$m이다. (답. 0.074C)

17. 다음의 글의 □안에 알맞는 말을 써넣어라. 방향은 그림 4-63과 같이 동, 서, 남, 북으로 대답하여라. 고른자기마당 B에 수직인 평면에 ㄷ자모양의 도선을 놓고 그우에 곧은 도선토막 L을 건늬여놓았다. 이 도선토막을 동쪽으로 일정한 속도 v로 이동시킨다. AD//BC, AB⊥BC이고 도선토막의 저항은 없는것으로 본다. ㄷ자모양의 도선가운데에는 저항 R가 있다.

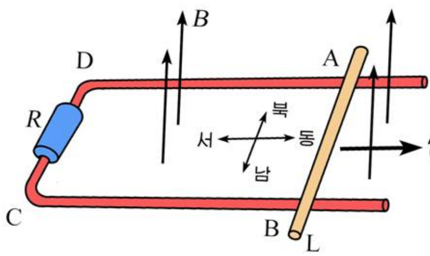


그림 4-63

ㄱ) 도선토막 L에서 AB부분의 길이를 ℓ이라고 하면 여기에 생긴 유도전동력의 크기는 □이고 그 전류의 방향은 □쪽이다.

ㄴ) ㄷ자모양의 도선은 자기마당에 대하여 멎어있으므로 이 부분에 생기는 유도전동력의 크기는 □이다. 따라서 닫긴회로 ABCD에 생긴 유도전동력은 전체적으로 □이다.

ㄷ) 도선토막 AB부분의 저항이 없다고 하면 회로 ABCD에 흐르는 전류의 세기는 □이고 그 방향은 렌쯔의 규칙에 따라 A→B→C→D→A의 방향이다. 여기서 도선토막 L의 AB부분은 전원의 □회로, ㄷ자모양의 회로는 전원의 외부회로와 같다.

ㄹ) 이때 저항 R에서 소비되는 전력은 □이다.

ㅁ) 한편 도선토막 L에 흐르는 전류는 자기마당으로부터 □쪽으로 향하는 힘을 받으며 그 크기는 □이다.

ㅂ) 점 A, B에서 마찰이 없다면 도선토막 L을 일정한 속도로 운동시키기 위하여 도선토막 L에 외부힘 □을 □쪽으로 주어야 한다.

ㅅ) 이 외부힘이 하는 일능률은 □이고 이것은 에네르기보존법칙에 따라 닫긴회로에서 소비되는 전력과 같다.

18. 드림선우로 향하는 자기유도가 B인 고른자기마당속에 그림 4-64와 같이 매끈한 평행도선《레루》가 수평면과 각 θ를 이루고있다. 《레루》의 웃쪽에는 저항 R를 련결하고 이 《레루》우에 질량이 m인 금속

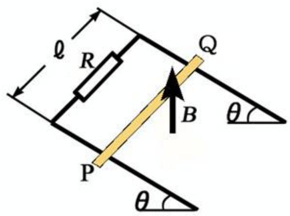


그림 4-64

막대기 PQ(저항을 무시)를 수직으로 건너놓고 가만히 놓아준다. 금속막대기와 《레루》사이 마찰은 무시한다.

ㄱ) 막대기 PQ가 속도 v로 미끄러져내릴 때 PQ에 흐르는 전류의 세기와 PQ에 작용하는 자기힘은 얼마인가?

ㄴ) 《레루》가 충분히 길다면 막대기 PQ의 마지막속도는 얼마인가?

(**답.** ㄱ) $I=\dfrac{vB\ell\cos\theta}{R}$, $F=\dfrac{vB^2\ell^2\cos\theta}{R}$ ㄴ) $v=\dfrac{mgR\tan\theta}{B^2\ell^2\cos\theta}$)

19. 그림 4-65와 같이 평행도선《레루》 AB와 CD를 수평면에 ℓ만 한 거리를 두고 놓고 그사이에 저항이 R, 전동력이 $\mathscr{E}$인 전지, 스위치 K를 련결하였다. 고른자기마당 B를 드림선아래로 향하게 작용시키고 두 《레루》우에 길이가 ℓ, 질량이 m인 금속막대기를 놓았다. 금속막대기와 《레루》사이의 마찰결수가 μ라면 금속막대기가 얼마만한 속도로 등속직선운동을 할수 있겠는가?

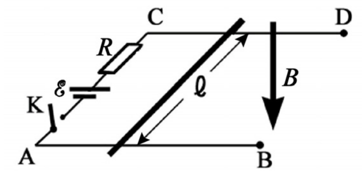


그림 4-65

(**답.** $v=\dfrac{\mathscr{E}B\ell-\mu mgR}{B^2\ell^2}$)

20. 드림선아래로 향하는 고른자기마당 B속에서 길이가 ℓ인 막대기가 막대기의 끝점을 지나는 드림선을 축으로 하여 수평면에서 각속도 ω로 돌아간다. 막대기에 생기는 유도전동력은 얼마인가? 만일 축을 막대기의 길이의 1/3되는 점으로 옮기면 얼마의 유도전동력이 생기겠는가?

(**답.** $\dfrac{1}{2}B\omega\ell^2$, $\dfrac{1}{6}B\omega\ell^2$)

21. 길이가 ℓ, 반경이 r, 권회수가 N인 원통형선륜이 있다.($r\ll\ell$) 선륜을 감은 금속선의 저항은 R이다. 선륜에 흐르는 전류가 $I=kt$ 관계로 시간에 따라 증가한다면 선륜의 두 단자사이의 전압은 얼마인가?

(**답.** $U=kRt+k\mu_0\pi\dfrac{N^2r^2}{\ell}$)

22. 그림 4-66과 같이 직4각형회로 abcd가 고른자기마당속에서 50s^{-1}의 회전수로 그림에 표시된 상태로부터 회전하기 시작한다. 여기서 B=0.1T, ad=bc=10cm, ab=cd=20cm이다. 다음의 량들을 구하여라.

ㄱ) 닫긴회로의 회전각속도

ㄴ) 변 ab의 선속도

ㄷ) 닫긴회로에 생기는 유도전동력의 최대크기

ㄹ) 1/300s후의 유도전동력의 크기

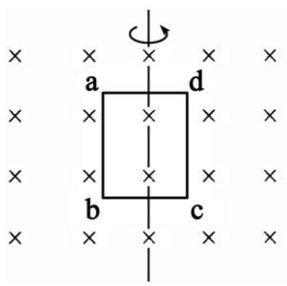


그림 4-66

(**답.** ㄱ) $100\pi\text{s}^{-1}$ ㄴ) 5πm/s ㄷ) 0.628V ㄹ) 0.544V)

23. 그림 4-67의 ㄱ에는 간격이 d인 두 평행평판 A, B가 표시되여있는데 여기에 전압을 걸면 평판사이에는 고른전기마당이 생긴다. 여기에 그림의 ㄴ와 같이 변하는 직각임풀스교류전압을 걸어주었는데 $t=0$인 순간 A판의 전위가 B판보다 높았다. $t=0$인 순간 B판가까이에 전자(전기량 e, 질량 m)를 가만히 놓았는데 전자가 A판에 닿을 때 그의 운동량이 최대로 되게 하자면 이 임풀스교류전압의 주파수가 최대로 얼마를 넘지 말아야 하겠는가?

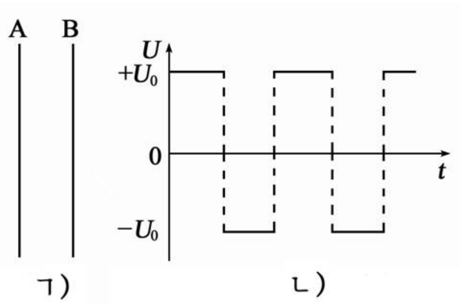


그림 4-67

(답. $f \leqslant \sqrt{\frac{eU_0}{8md^2}}$)

24. 10cm×30 cm의 직4각형틀에 10번 감은 선륜이 회전축에 수직인 고른자기마당($B=2\times10^{-2}$ T)속에서 100rad/s의 각속도로 돌고있다. 이 선륜에 생기는 전동력의 최대값은 얼마인가?

(답. 0.6V)

25. 그림 4-68에서처럼 직4각형회로 abcd가 고른자기마당속에서 회전하면서 $\mathscr{E}=200\sqrt{2}\sin 100\pi t$의 전동력을 낸다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

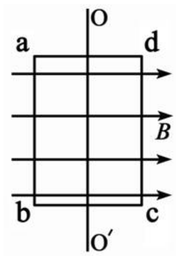


그림 4-68

ㄱ) 이 교류전압의 주파수는 100Hz이다.
ㄴ) 이 교류전압의 실효값은 $200\sqrt{2}$ V이다.
ㄷ) 주파수가 커질 때 전동력의 최대값도 커진다.
ㄹ) 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 최대인 때 전동력도 최대이다.

26. 어떤 교류발전기가 내는 전동력이 $\mathscr{E}=\mathscr{E}_0\sin\omega t$로 표시된다. 이 발전기의 회전수를 2배로 크게 할 때 생기는 전동력은 아래와 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $2\mathscr{E}_0\sin\frac{1}{2}\omega t$　　ㄷ) $\mathscr{E}_0\sin 2\omega t$

ㄴ) $2\mathscr{E}_0\sin 2\omega t$　　ㄹ) $\mathscr{E}_0\sin\frac{1}{2}\omega t$

27. 그림 4-69와 같이 변하는 교류전압이 있다. 이 전압을 100Ω의 저항에 걸어주었다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 교류의 주파수는 100Hz이다.
ㄴ) 교류전류의 세기의 실효값은 1A이다.
ㄷ) 0.005s인 순간 교류의 방향이 바뀐다.
ㄹ) 1s당 100J의 열이 저항에서 나온다.

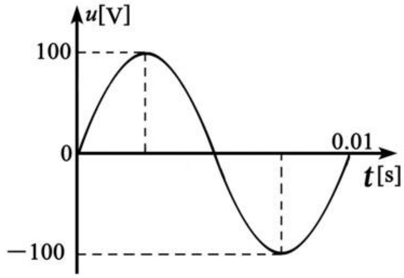


그림 4-69

28. 어떤 소형발전기의 선륜은 권회수가 10회이고 변의 길이가 20cm, 저항이 1.5Ω인 바른4각형회로이다. 이 선륜은 0.8T의 고른자기마당속에서 600min^{-1}의 회전수로 회전한다. 송전선의 저항이 0.5Ω이라면 이 발전기에 의해서 《12V, 6W》의 전등을 몇개나 정상적으로 켤수 있겠는가? (답. 2개)

29. 다음 글의 □안에 알맞는 글을 써넣어라.

교류발전기의 원리는 □에 기초하고있다. □속에서 선륜을 돌리면 선륜의 두 단자사이에 전압이 생긴다. 선륜에 생기는 유도전동력의 최대값(진폭)은 □와 선륜의 □, □, □에 비례한다. 교류의 주파수는 선륜의 □에 의하여 결정된다. 선륜에 생기는 전동력이 최대로 되는 순간은 선륜의 면이 자기마당의 방향에 □인 때이다. 교류전압이 200V라는 말은 교류전압의 □을 가리키는것이다. 교류의 실효값은 그 최대값의 □과 같다. 교류전압 200V의 최대값은 약 □이다. 교류용계기의 바늘은 □을 가리킨다.

30. 자체유도결수가 0.5H, 저항이 5Ω인 선륜이 있다. 이 선륜에 흐르는 전류가 0.01s사이에 0.2A로부터 0.1A로 감소하였다. 전류가 감소하기 시작한 순간에 선륜의 두 단자에 걸린 전압은 몇V인가? (답. -4V)

31. 1차권선에 200V의 전압을 걸었을 때 2차권선에 60V의 전압이 생기는 변압기가 있다. 두 권선의 저항은 없는것으로 보고 다음 물음에 대답하여라.

ㄱ) 1차권선의 권회수가 1200회라면 2차권선의 권회수는 얼마인가?

ㄴ) 2차권선에 5Ω의 저항을 이으면 1차권선에 흐르는 전류의 세기는 얼마인가? (답. ㄱ) 360회 ㄴ) 3.6A)

32. 변압기의 1차쪽에 200V의 교류전원, 2차쪽에 100V용500W의 전열기를 이었다. AB, CD사이의 전기줄의 저항은 각각 1Ω이다. 그리고 전류계 A_1, A_2, 전압계 V_1, V_2을 그림 4-70과 같이 이었다.

① V_1이 100V를 가리킬 때

ㄱ) A_2은 몇A를 가리키겠는가?

ㄴ) V_2은 몇V를 가리키겠는가?

ㄷ) 2차쪽의 총소비전력은 얼마인가? 2차권선의 저항은 생각하지 않는다.

ㄹ) 1차쪽의 전력이 완전히 2차쪽으로 넘어간다면 A_1은 몇A를 가리키는가? 1차권선의 저항은 생각하지 않는다.

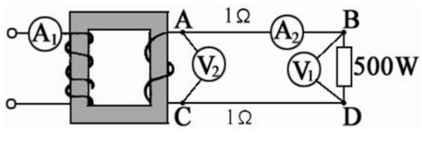


그림 4-70

② 전열기를 떼였을 때 V_1은 몇V를 가리키는가? 변압기의 권회수비는 1.8:1이다.

(답. ① ㄱ) 5A ㄴ) 110V ㄷ) 550W ㄹ) 2.75A ② 111V)

33. 1km당 저항이 0.44Ω이고 전체 길이가 100km인 송전선으로 10만kW의 전력을 보내는 경우에 송전선에서 열손실이 4%이하로 되게 하자면 전압을 몇V이상으로 하여야 하는가? (답. 332 000V)

제 5 장. 류체의 운동

위대한 수령 **김일성**대원수님께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《선박공업을 발전시키는것은 세면에 바다를 끼고있는 우리 나라의 조건에서 교통운수를 발전시키며 국방력을 강화하는데서도 매우 중요한 의의를 가집니다.》

세면에 바다를 끼고있는 우리 나라에서 대형선박들과 고기배들, 전투함선들을 잘 만드는것은 나라의 경제를 발전시키며 국방력을 강화하고 인민생활을 높이는데서 매우 중요한 문제로 나선다.

액체나 기체처럼 흐르는 성질을 가진 물체를 **류체**라고 부른다.

현대적인 배나 비행기, 로케트들을 만들자면 류체의 성질을 잘 알고 류체속에서 운동하는 물체의 특성을 고려하여야 한다.

이 장에서는 평형상태에 있는 류체의 성질과 류체의 압력이 하는 일, 리상류체와 끈기류체에서 성립하는 법칙성들과 그 응용에 대하여 학습한다.



제 1 절. 흐름속도와 자름면적사이관계

류선과 류관

류체가 흐를 때 류체를 이루는 매 부분들의 운동은 제가끔 다르다.

다시말하여 류체알갱이들의 운동은 제가끔 다르다.

※ 류체알갱이라고 말할 때에는 하나의 분자를 념두에 두는것이 아니라 우리가 고찰하는 물체의 크기나 그릇의 크기에 비하여서는 매우 작지만 많은 수의 분자들이 들어있는 류체의 작은 부분을 의미한다.

류체의 흐름을 직관적으로 표시하기 위하여 류선을 약속한다.

류체속에 어떤 곡선을 그렸을 때 곡선우의 매 점에서 그은 접선방향이 그 점에서의 류체알갱이의 운동방향(속도방향)과 같은 곡선을 **류선**이라고 부른다.(그림 5-1)

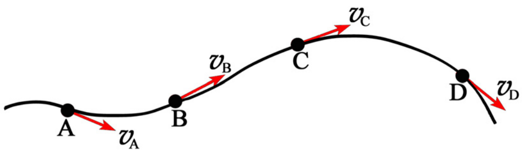


그림 5-1. 류선

류선은 류체알갱이들이 운동하는 가상적인 선이다.

류선의 모양이 시간에 따라 변하지 않는 흐름을 **정상흐름**이라고 부른다.

다시말하여 류체가 흐르는 공간의 매 점에서 류체알갱이들의 속도(크기와 방향)가 시간에 따라 변하지 않는 흐름이 정상흐름이다.

정상흐름인 때 류선을 따라 류체알갱이들이 움직여가므로 류선은 류체알갱이의 자리길과 일치한다.

정상흐름인 때 류선들은 서로 사귀지 않는다.

그것은 류선이 사귄다면 사귐점에 있는 류체알갱이는 동시에 두개의 방향으로 운동해야 하기때문이다.

류선들로 둘러싸인 가상적인 관을 **류관(흐름관)**이라고 부른다.(그림 5-2)

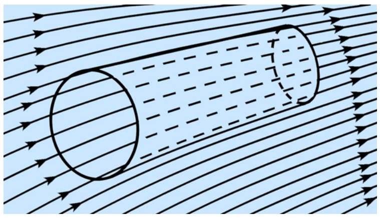


그림 5-2. 류관

류관은 가상적인 관이지만 정상흐름인 때 류체알갱이들이 류선을 따라 흐르므로 류관속의 류체가 밖으로 나오지 못한다.

그러므로 류관을 실지관처럼 생각해도 된다.

흐름의 련속성의 정리

물과 같은 액체는 밖에서 큰 압력으로 눌러도 체적이 달라지지 않으므로 밀도가 변하지 않는다.

이러한 성질을 **비압축성**이라고 부르며 비압축성을 가지는 류체의 흐름을 **비압축성흐름**이라고 부른다.

? 류관을 따라 비압축성류체가 흐를 때 흐르는 류체의 속도는 무엇에 관계되겠는가.(그림 5-3)

비압축성류체가 정상흐름을 이룰 때 류관의 어떤 자름면을 통하여 흘러들어오는 류체의 체적은 다른 자름면을 통하여 흘러나오는 류체의 체적과 같다.

$$V_1 = V_2 \quad (1)$$

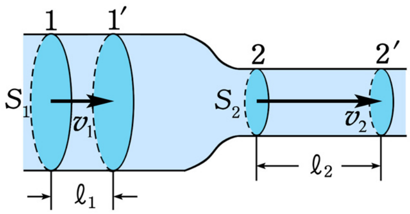


그림 5-3. 관을 따라 류체가 흐를 때 $S_1v_1 = S_2v_2$

면 1과 면 2의 자름면적을 각각 S_1, S_2, 이곳을 지날 때의 류체의 속도를 각각 v_1, v_2이라고 하자.

어떤 Δt 시간동안에 류체가 면 1을 지나는 거리는 $\ell_1=v_1\cdot\Delta t$ 이고 면 2를 지나는 거리는 $\ell_2=v_2\cdot\Delta t$ 이므로 Δt 시간동안 면 1을 지나 흘러들어오는 류체의 체적은 $V_1 = S_1 v_1\cdot\Delta t$, 면 2를 지나 흘러나오는 류체의 체적은 $V_2 = S_2 v_2\cdot\Delta t$ 이다.

식 1로부터 $S_1 v_1\cdot\Delta t = S_2 v_2\cdot\Delta t$ 이므로

$$S_1v_1 = S_2v_2 \quad (2)$$

와 같다.

Sv=일정 **자름면적과 속도사이관계** (3)

정상흐름인 때 관의 자름면적과 그 면을 지나는 류체의 속도를 곱한 값은 늘 일정하다. 이것을 **흐름의 련속성의 정리**라고 부른다.

흐름의 련속성의 정리는 류관을 따라 류체가 흐를 때 류체의 속도가 자름면적에 거꿀비례한다는것을 보여준다.

즉 류체가 류관의 넓은 곳을 지날 때는 속도가 뜨고 좁은 곳을 지날 때에는 속도가 빠르다.

이것은 류관이 넓은 곳에서는 류선이 보다 성글고 좁은 곳에서는 류선이 보다 배다는것을 보여준다.

그러므로 류선의 밀도로 류체의 속도의 크기를 표시할수 있다.

층흐름과 막흐름

류체속에 물체를 놓고 류체의 속도를 높이면서 류선들의 모양을 살펴보자.

물체의 속도가 작을 때에는 류선들의 모양이 변하지 않지만 속도가 어떤 한계값을 넘으면 류선들이 헝클어진다.(그림 5-4)

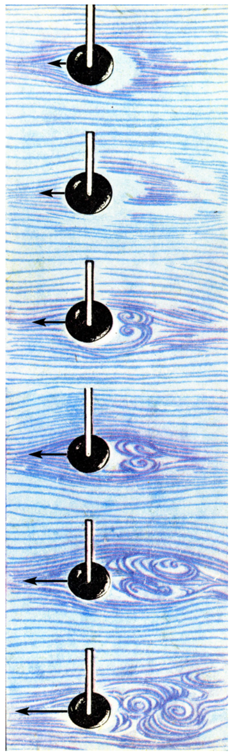


그림 5-4. 속도에 따르는 류선들의 모양

류선이 고르로운 흐름을 **층흐름**, 류선이 헝클어지는 흐름을 **막흐름**이라고 부른다.

막흐름이 생기는것은 흐름속도가 어떤 한계값을 넘어서면 류체의 운동이 불안정해지기때문이다. 다시말하여 류체알갱이가 어떤 원인으로 하여 원래의 흐름에서 약간 벗어나기만 하면 점점 더 벗어나 헝클어지기때문이다.

류체속에서 운동하는 물체뒤에 막흐름이 생기면 저항이 커진다.

그러므로 비행기나 배, 잠수함 등은 달릴 때 막흐름이 생기지 않도록 하여야 한다.

막흐름이 생길 때 물체뒤에는 소용돌이 즉 크고작은 회리들이 나타난다.

[**례제**] 주사기의 피스톤을 누를 때 바늘구멍에서 약물이 세게 뿜어져나간다. 왜 그런가?(그림 5-5)



그림 5-5

풀이. 주사기안에 약물이 들어있는 부분과 바늘구멍을 하나의 류관으로 보면 피스톤이 나드는 부분의 자름면적은 크고 바늘구멍의 자름면적은 작다.

약물의 속도는 자름면적에 거꿀비례하므로 피스톤의 속도는 작지만 뿜어져나오는 약물의 속도는 크다.

즉 세게 뿜어져나온다.



밖에서 준 압력에 의하여 체적이 줄어드는 압축성류체에서 흐름의 련속성의 정리는 《 $\rho Sv = 일정$ 》으로 표시된다. 왜 그런가?

문 제

1. 류체의 여러 점들에서 속도가 그림 5-6의 ㄱ, ㄴ와 같다. 류선을 각각 그리여라.

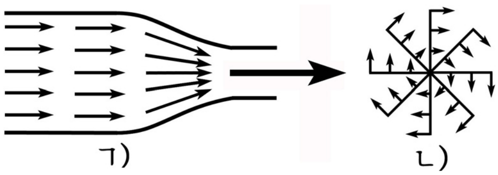


그림 5-6

2. 물을 가득 채운 주사기를 곧추 세우고 피스톤을 5cm/s의 속도로 올려밀었다. 피스톤과 주둥이의 직경이 각각 2cm, 2mm라면 물줄기는 얼마만한 높이까지 올라가겠는가?
3. 사람의 몸에서 피흐름속도는 모세관에서보다 동맥에서 훨씬 크다. 이것은 흐름의 련속성의 정리에 모순되지 않는가?

제 2 절. 류체의 압력이 하는 일

고체의 운동을 따질 때에는 보통 힘을 따지지만 류체의 운동을 고찰할 때에는 힘을 따지는것보다 압력을 따지는것이 편리하다. 그것은 고체에서는 준 힘이 고체와 닿은 접촉점을 통해서 전달될수 있지만 류체에서는 준 힘이 반드시 류체를 통하여 물체의 겉면전체에 전달되기때문이다.

그러므로 류체에서는 단위면적에 수직으로 작용하는 힘인 압력을 따져 운동을 고찰한다.

류체의 압력과 일사이의 관계

우리는 일상생활에서 관을 통하여 류체(액체 또는 기체)를 나르는것을 많이 볼수 있다.

관을 통하여 류체를 나르자면 관의 두끝에 압력차를 주어야 한다. 이때 류체에 작용한 압력은 류체를 나르는 일을 한다.

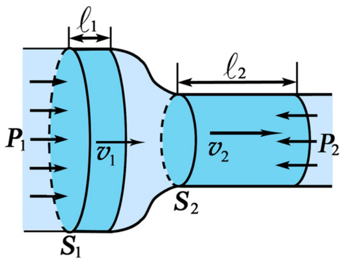


그림 5-7. 압력이 하는 일

류체에 작용한 압력이 하는 일은 무엇에 관계되는가.

그림 5-7과 같이 자름면적이 각각 S_1, S_2 인 관의 두끝에서 압력 P_1, P_2 을 받아 류체가 v_1, v_2 의 속도로 흐른다고 하자.

이때 압력 P_2 은 앞부분의 류체로부터 받는 압력이므로 류체의 흐름방향과 반대방향으로 작용한다. 그러므로 P_1은 +, P_2은 −일을 한다.

P_1와 P_2이 면 S_1과 S_2에 주는 힘의 크기는 $F_1 = P_1S_1$, $F_2 = P_2S_2$이고 류체가 Δt 시간동안에 움직여간 거리는 $\ell_1 = v_1 \cdot \Delta t$, $\ell_2 = v_2 \cdot \Delta t$ 이다.

그러므로 류체에 작용한 압력이 하는 일은

$$A = F_1\ell_1 - F_2\ell_2 = P_1S_1\ell_1 - P_2S_2\ell_2 = P_1V_1 - P_2V_2$$

웃식에서 V_1 와 V_2 은 자름면 S_1 과 S_2 을 통하여 Δt 시간동안에 지나는 류체의 체적이다. 비압축성류체에서는 압력을 받아도 류체의 체적이 변하지 않으므로 $V_1 = V_2 = V$ 이다. 그러므로 웃식을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$A = (P_1 - P_2)V \qquad \text{압력이 하는 일}$$

관을 따라 류체가 흐를 때 류체의 압력이 하는 일은 관의 두 끝에서의 압력차와 흘러간 류체의 체적을 곱한것과 같다.

이 결과는 류관에서도 그대로 성립한다.

액체의 깊이와 압력사이관계

멎어있는 류체의 어떤 점에서의 압력은 모든 방향에서 같다.

또한 류체속에 잠긴 물체는 류체로부터 류체와 닿아있는 면에 수직인 방향으로 압력을 받는다.

액체의 압력은 액체의 깊이에 따라 어떻게 변하겠는가.

액체겉면으로부터 높이가 h인 원기둥모양의 액체기둥부분을 살펴보자.(그림 5-8)

액체기둥의 밑면의 면적을 S라고 하면 이 액체기둥부분은 중력의 작용으로 하여 밑면 S를 통하여 아래부분을 내려누른다.

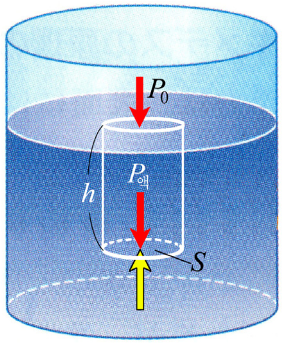


그림 5-8. 액체의 깊이에 따르는 압력의 변화

액체가 멎어있는 조건에서 이 액체기둥의 아래부분은 뉴톤의 제3법칙에 따라 크기가 같고 방향이 반대인 힘을 받는다. 즉 액체기둥 아래부분의 액체는 이 액체기둥의 밑면을 올려민다. 이 힘들에 의하여 액체의 압력이 생겨난다.

밑면 S가 액체기둥으로부터 받는 힘은

$$F = mg = \rho Vg = \rho S hg$$

이다. 여기서 ρ는 액체의 밀도, g는 중력가속도, V는 액체기둥의 체적이다. 이 힘에 의한 압력을 $P_{액}$이라고 하면 $F = P_{액}S$이므로

$$P_{액} = \rho gh$$

이다. 따라서 깊이가 h인 곳에서 압력 P는 대기압을 P_0이라고 할 때

$$P = P_0 + P_{액}$$

이다. 겉면에서는 $h=0$이므로 $P_{액}=0$이며 따라서 액체겉면에서 압력은 대기압 P_0과 같다. 그러므로

$$P = P_0 + \rho g h \quad \text{깊이에 따르는 액체의 압력}$$

따라서 멎어있는 액체의 압력은 깊이가 깊어질수록 커진다.

다시말하여 멎어있는 액체의 압력은 액체의 겉면에서 단위길이(1m)만큼 깊어질 때마다 ρg만큼씩 커진다.

생각하기 측력계를 리용하여 뜰힘을 어떻게 잴수 있는가?

문 제

1. 압축기로 500kPa의 압력차를 만들어 100t의 수도물을 보낼 때 압축기가 하는 일은 얼마인가? 이때 관이 수평으로 놓여있고 수도물이 등속으로 흐른다면 압축기가 하는 일은 어디에 들었겠는가?
2. 무게가 없는 곳에서도 뜰힘이 생기겠는가?

3. 다음 문장의 □안에 알맞는것을 선택하여넣고 그 근거를 설명하여라.

한 변의 길이가 8cm인 바른6면체의 질량이 0.5kg이다. 이 물체는 물에 □

ㄱ) 완전히 잠기여 떠있다. ㄴ) 일부가 잠기여 떠있다. ㄷ) 가라앉는다.

4. 수소를 채운 1t짜리 기구가 공중에 떠있다. 기구의 체적은 얼마인가? 공기의 밀도는 1.29kg/m^{3}이다. 기구가 구모양이라면 반경은 얼마인가?

5. 다음 문장에서 □안에 알맞는것을 선택하여넣고 그 근거를 간단히 설명하여라.

물그릇에 양초의 밑부분을 조금 무겁게 하여 양초를 곧바로 띄워세우고 불을 달았다. 초가 탈 때 초는 그릇의 외부에 대하여 □

ㄱ) 가만히 멎어있다. ㄴ) 아래로 내려간다. ㄷ) 우로 올라간다.

6. 뜰힘의 크기가 $F=\rho gV$ 임을 이끌어내여라.

제 3 절. 베르누이정리

류체의 압력과 속도사이관계

흐르는 류체를 특징짓는 량은 압력과 속도이다.

류체의 압력은 속도에 따라 어떻게 변하겠는가.

이것을 비압축성류체의 정상흐름에서 따져보기로 하자.

실험

○ 자름면이 고르롭지 않은 수평흐름관으로 그림 5-9의 ㄱ와 같은 장치를 만든다.

○ 유리관끝을 마개로 막고 변 K를 열어놓았을 때 두 유리관에서 물기둥의 높이를 잰다. 이때 련통관의 원리에 의하여 두 유리관에서 물기둥의 높이는 같다.

○ 그림 5-9의 ㄴ와 같이 유리관끝에서 마개를 떼여 물이 흐르게 하면서 두 유리관에서 물기둥의 높이를 잰다. 가는 유리관에 꽂혀있는 유리관에서의 물기둥의 높이가 굵은 유리관에 꽂혀있는 유리관에서보다 낮다.

○ 그림 5-9의 ㄷ와 같이 실험장치를 만들고 수평흐름관속으로 공기가 흐르게 하면서 U자형압력계에서 물기둥의 높이를 잰다. 이때 U자형압력계에서 물기둥의 높이는 달라진다.

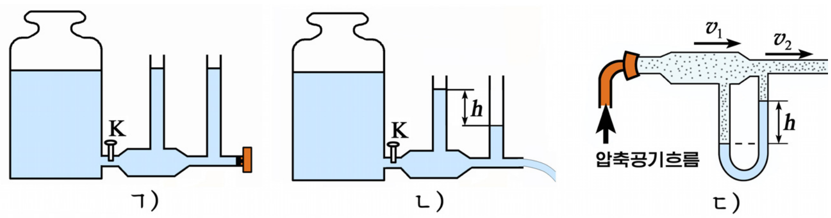


그림 5-9. 물과 기체의 흐름속도와 압력사이관계를 알아보는 실험

이러한 실험으로부터 류체의 압력과 속도사이에 다음과 같은 관계가 있다는것을 알수 있다.

류체의 흐름속도가 작은 곳에서 압력은 크고 흐름속도가 큰 곳에서 압력은 작다.

베르누이정리

류체의 흐름속도가 빠른 곳에서 압력이 왜 작아지는가.

이것을 비압축성류체의 정상흐름에서 압력이 하는 일과 류체의 력학적에네르기변화사이의 관계로 밝혀보기로 하자.

아래로 굽은 관을 따라 액체가 흐를 때 자름면적이 S_1, S_2 인 두 자름면에서 흐름속도를 v_1, v_2, 자름면까지의 높이를 h_1, h_2, 류체의 압력을 P_1, P_2 이라고 하자.(그림 5-10)

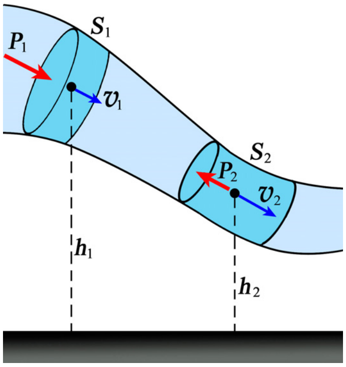


그림 5-10. 흐름속도와 압력사이관계

이때 자름면 S_1 에 작용하는 압력 P_1 는 류체의 흐름방향과 같으므로 +일을 하며 S_2 에 작용하는 압력 P_2 은 류체의 흐름방향과 반대이므로 −일을 한다.

한편 비압축성류체이므로 어떤 시간동안에 S_1 를 지나서 흘러들어오는 류체의 질량은 S_2 을 지나서 흘러나오는 류체의 질량과 같다.

$$m = m_1 = m_2 = \rho V$$

여기서 V 는 어떤 시간동안에 자름면을 지나는 류체의 체적이다.

류체에서 마찰이 없다면 압력이 하는 일만큼 류체의 력학적에네르기가 변하므로

$$(P_1 - P_2)V = (\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2) - (\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1) = \rho V(\frac{1}{2}v_2^2 + gh_2 - \frac{1}{2}v_1^2 - gh_1)$$

이것을 정리하면

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \rho gh_1 \qquad (1)$$

이다. 즉 류체의 임의의 곳에서 다음 식이 성립된다.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 = \mathrm{C}\ (\text{일정}) \qquad \textbf{베르누이정리} \qquad (2)$$

식 2에서 P 를 **정압**, $\frac{1}{2}\rho v^2$ 을 **동압**, ρgh 를 **자리압**이라고 하며 정압과 동압, 자리압의 합을 **전압(전압력)**이라고 부른다.

정압 P 는 류체에서 실제적으로 나타나는 압력이며 동압 $\frac{1}{2}\rho v^2$ 은 류체가 운동함으로 하여 가지는 압력이지만 나타나지 않다가 류체가 멎을 때 $\frac{1}{2}\rho v^2$ 만 한 압력

으로 나타난다. 자리압 ρgh 는 류체의 자리가 h 만큼 변할 때 ρgh 만 한 크기의 압력으로 나타난다.

그러므로 류체의 정상흐름에서 류체의 전압력은 자리와 시간에 관계없이 일정하다. 즉 비압축성류체에서 정상흐름인 때 류체의 흐름속도가 빠른 곳에서 압력은 작고 흐름속도가 느린 곳에서 압력은 크다. 이것을 **베르누이정리**라고 부른다.

베르누이정리는 베르누이가 1738년 류체의 운동을 연구하는 과정에 발견하였다.

식 2에서 정압 P 는 단위체적의 류체를 흐르게 할 때 압력이 하는 일이고 동압 $\frac{1}{2}\rho v^2$ 은 단위체적의 류체가 흐를 때 가지는 운동에네르기이며 자리압 ρgh 는 단위체적의 류체가 가지는 자리에네르기와 같다.

그러므로 베르누이정리는 단위체적의 류체가 가지는 에네르기에 대한 력학적에네르기보존법칙이다.

만일 류관이 수평으로 놓여있다면 $h_1 = h_2$ 이므로 베르누이정리는 다음과 같이 표시된다.

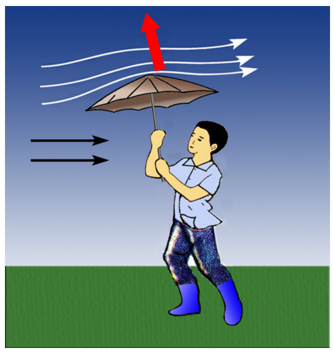
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

즉

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \mathrm{C}\,(\text{일정}) \qquad (3)$$

식 3은 류체의 압력과 흐름속도사이관계를 보여준다.

생각하기 그림 5-11에서 우산은 왜 힘을 받겠는가?


그림 5-11. 우산이 힘을 받는다

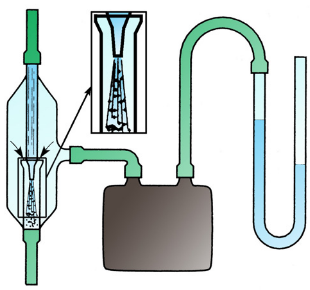
베르누이정리는 류체에 작용하는 력학적에네르기보존법칙이므로 류체에서 끈기(점성)로 하여 생기는 저항힘이 없을 때 성립한다.

일반적으로 모든 류체는 끈기를 다 가지고있다. 그러나 끈기가 작아서 끈기를 무시할수 있을 때 그 류체를 **리상류체**라고 부른다.

베르누이정리는 리상류체에서 정상흐름인 때 성립한다.

베르누이정리의 응용

베르누이정리를 류수뽐프에 리용하여 낮은 압력을 얻어낸다.(그림 5-12)


그림 5-12. 류수뽐프

류수뽐프의 좁은 관으로 물을 세게 뿜어주면 이 부분에서 압력이 낮아지므로 그릇안의 공기가 빨리워나온다. 이러한 류수뽐프로 그릇안의 압력을 수백Pa까지 낮출수 있다. 공장들에서는 규모가 큰 류수뽐프로 물질을

진공분류하여 갈라낸다.

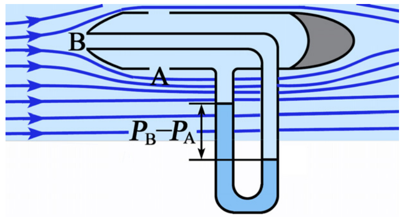


그림 5-13. 삐또관의 원리

한편 베르누이정리를 류체속에서 운동하는 물체례를 들어 비행기나 배의 운동속도를 재는데도 리용한다. 이러한 장치를 **삐또관**이라고 부른다.(그림 5-13)

B점에서 류체의 속도는 0이므로 정압 P_B만 있다. 즉 전압력은 $P=P_B$이다.

A점을 스쳐지나는 류체의 속도를 v라고 하면 A점에서는 정압 P_A와 동압 $\frac{1}{2}\rho v^2$이 작용하므로 전압력은 $P=P_A+\frac{1}{2}\rho v^2$이다. 여기서 ρ는 삐또관을 스쳐지나는 류체의 밀도이다. 두 점에서 전압력이 같으므로

$$P_B=P_A+\frac{1}{2}\rho v^2 \qquad 즉 \qquad \frac{1}{2}\rho v^2=P_B-P_A \tag{4}$$

한편 두곳에서 정압의 차가 삐또관에 이어진 압력계(U자형압력계)에서 액체기둥의 높이차 h를 나타내므로 액체의 밀도를 ρ'라고 하면

$$P_B-P_A=\rho' gh \tag{5}$$

식 4와 5로부터 $$\frac{1}{2}\rho v^2=\rho' gh$$

그러므로 류체의 속도는 $$v=\sqrt{\frac{2\rho' gh}{\rho}}$$

이외에도 베르누이정리는 자동차의 휘발유뿌무개나 류체의 흐름량을 재는데도 리용된다.



베르누이정리를 리용하여 물탕크에서 구멍으로 뿜어져나오는 물의 속도를 구하면 $v=\sqrt{2gh}$이다. 이것을 **토리첼리의 정리**라고 부른다. 이 정리를 유도하여보아라.(그림 5-14)

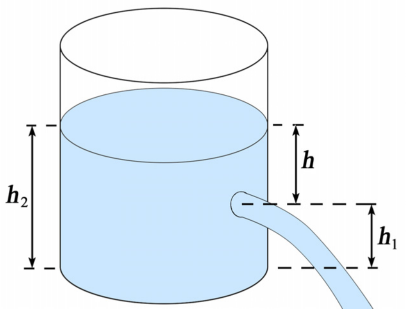


그림 5-14. 토리첼리의 정리를 설명하는 그림

[례제] 베르누이정리에 기초하여 뿌무개의 작용원리를 설명하여라.(그림 5-15)

풀이. 관 A속으로 공기를 불어넣으면 관의 좁은 곳 B에서 흐름속도가 더 빨라진다. 속도가 빠른 곳에서 압력이 더 작아지므로 이곳에서 압력이 대기압보다 더 낮아질수 있다. 그러면 그릇에 담겨져있는 액체가 관 C를 따라 빨리워올라와 관 C의 끝에서는 센 공기흐름에 의하여 작은 액체방울들로 갈라지면서 뿜어져나간다.

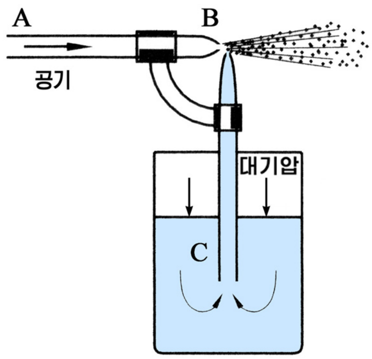


그림 5-15

문 제

1. 종이장을 서로 가까이 하고 종이장사이로 빠른 공기의 흐름을 흘려보내면 종이장이 서로 맞붙는다. 실험을 하여보고 그 까닭을 설명하여라.(그림 5-16)

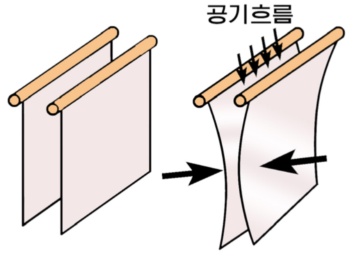


그림 5-16

2. 같은 방향으로 나란히 달리는 두 배가 가까이 다가가면 서로 끌리운다. 왜 그런가?
3. 자동차휘발유뿌무개의 작용원리를 베르누이정리로 설명하여라.(그림 5-17)

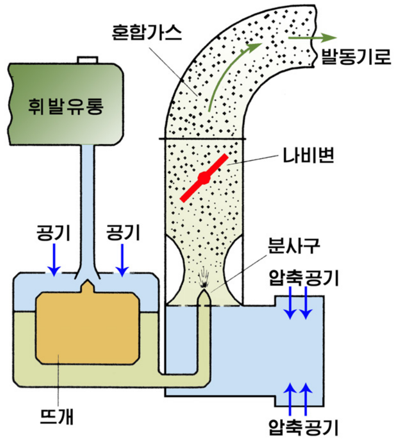


그림 5-17

4. 다음의 □안에 알맞는 글을 써넣어라.
   공기가 v_1의 속도로 이동하고있을 때의 압력 P_1와 멎어있을 때의 압력 P_2 사이에 □의 관계가 성립되므로 이동할 때의 압력 P_1가 멎어있을 때의 압력 P_2보다 더 □. 그러므로 공기가 이동할 때와 멎어있을 때 압력차는 □이다. 공기의 이동속도가 v_1=10m/s이고 공기의 밀도가 $\rho=1.29$ kg/m^{3}이라면 이동할 때의 압력은 □만큼 □.
5. 관의 반경이 2cm인 물총을 우로 향하게 하고 50N의 힘으로 피스톤을 밀면 물줄기가 얼마만한 높이까지 올라가겠는가?

제 4 절. 마그누스효과와 비행기의 양력

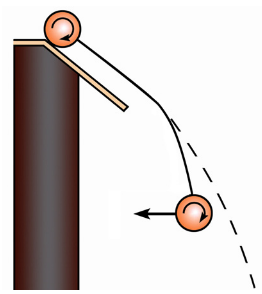
마그누스효과

우리는 축구경기나 탁구경기를 보면서 모서리뽈을 차거나 탁구공을 깎아칠 때 공의 자리길이 굽어드는 현상을 자주 보았다. 이것을 실험으로 알아보자.

실험

○ 그림 5-18과 같이 경사진 면우에서 물체가 미끄러져내리게 하고 물체가 떨어지는 자리길을 자세히 살펴본다.

○ 다음 경사진 면우에서 가벼운 종이원통을 굴러내리게 한 후 종이원통이 떨어지는 자리길을 자세히 살펴본다. 굴러내리는 종이원통이 미끄러져내리는 물체보다 자리길이 더 책상쪽으로 굽어든다.


그림 5-18. 종이원통의 자리길이 굽어든다

마그누스는 1852년에 비행하는 포탄의 운동을 연구하는 과정에 류체속에서 회전하면서 운동하는 물체의 자리길이 굽어드는 효과를 발견하였다.

그러면 왜 류체속에서 돌면서 운동하는 물체의 자리길이 굽어드는가.

물체가 류체속에서 속도 v로 운동하는것을 멎어있는 물체둘레로 류체가 속도 v로 흘러지난다고 볼수 있다.

물체가 류체속에서 그리 크지 않은 속도로 운동할 때에는 그림 5-19의 ㄱ와 같이 물체를 스쳐지나는 흐름이 생기며 물체의 웃부분과 아래부분에서 류체의 흐름속도는 같다. 그러므로 물체의 자리길은 굽어들지 않는다.

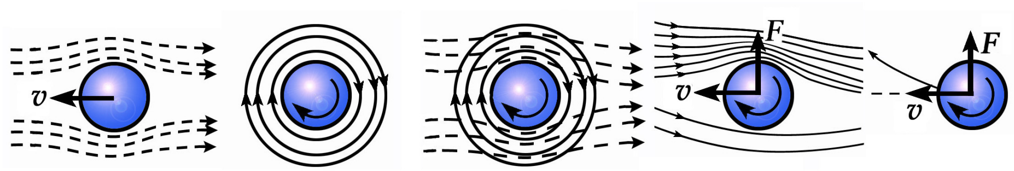


그림 5-19. 마그누스효과가 생기는 리치

물체가 류체속에서 돌기만 할 때에는 류체의 끈기로 하여 그림 ㄴ와 같이 물체주위에는 물체와 함께 따라도는 회전흐름이 생긴다.

물체가 돌면서 앞으로 나갈 때에는 이 두 흐름이 겹쳐진다.(그림 ㄷ)

그런데 물체의 웃부분에서는 물체를 스쳐지나는 흐름과 물체와 함께 도는 회전흐름방향이 같으므로 흐름속도가 빨라진다. 그러나 아래부분에서는 두 흐름방향이 반대이므로 흐름속도가 떠진다.(그림 ㄹ)

그러므로 속도가 빠른 물체의 웃부분에서 류체가 물체에 주는 압력은 아래부분에서 류체가 물체에 주는 압력보다 작아진다.

때문에 물체는 이 압력차에 의하여 우로 올려미는 힘 F를 받게 되며 물체의 자리길은 우로 굽어들게 된다.(그림 ㅁ)

이와 같이 물체가 류체속에서 돌면서 운동할 때 물체의 량쪽에서 생기는 압력차에 의한 힘을 받아 자리길이 굽어드는 현상을 **마그누스효과**라고 부른다.

물체의 자리길을 굽어들게 하는 힘은 물체를 스쳐지나는 흐름의 방향과 회전흐름방향이 일치하는쪽으로 향한다.

마그누스효과는 물체의 회전각속도가 크고 운동속도가 클수록 더 잘 나타난다.

비행기날개의 양력

비행기는 무거운 짐이나 많은 손님들을 태우고 하늘을 난다.

무거운 비행기가 어떻게 공중에 떠서 날겠는가.

이것은 비행기가 공중에서 날아갈 때 비행기날개에 우로 올려미는 양력이 작용하기때문이다.

비행기날개에 양력이 작용하는것을 마그누스효과로 설명할수 있다.

비행기날개의 자름면의 모양을 살펴보면 날개의 웃면과 아래면의 길이가 다르다.(그림 5-20)

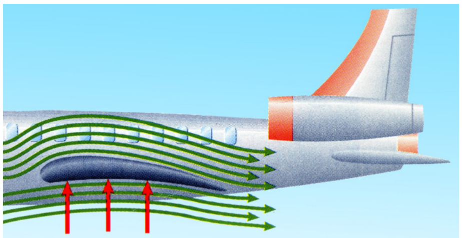


그림 5-20. 날개둘레의 류선

날개의 우와 아래에서 날개를 지나는 공기흐름의 류선모양을 따져보면 날개의 웃면에서 류선은 빽빽하게 놓이고 날개의 아래면에서 류선은 성글게 놓인다. 공기의 흐름은 날개의 앞끝에서 우, 아래로 갈라졌다가 날개의 뒤끄리에서 동시에 만난다. 그런데 날개의 웃면의 길이는 아래면의 길이보다 길다. 그러므로 날개를 스쳐지나는 공기흐름의 속도는 날개의 웃면에서 커지고 날개의 아래면에서는 작아진다. 베르누이정리에 의하여 흐름속도가 작은 곳에서 압력은 크고 흐름속도가 큰 곳에서 압력은 작아지므로 날개밑에서 날개를 우로 올려미는 압력이 날개를 우에서 내려누르는 압력보다 커진다.

이 압력차에 의하여 날개에는 우로 올려미는 힘인 양력이 작용한다.

<u>비행기날개의 양력은 날개의 웃면과 아래면을 스쳐지나는 공기흐름의 속도차때문에 웃면을 누르는 압력이 아래면을 올려미는 압력보다 작아지므로 생긴다.</u>

? 비행기의 양력은 무엇에 관계되는가.

실험에 의하면 양력은 날개를 스쳐지나는 공기흐름의 속도가 커지는데 따라 커지며 비행기날개의 마중각(수평면과 날개사이각)이 커지는데 따라 커지다가 어떤 한계를 넘으면 작아지기 시작한다.

왜 양력이 공기의 흐름속도와 마중각에 따라 변하겠는가.

날개를 스쳐지나는 공기의 흐름속도가 커질수록 비행기날개의 웃면과 아래면을 스쳐지나는 속도차가 커지므로 양력은 커진다.

한편 비행기날개를 스쳐지나는 공기의 흐름은 날개의 뾰족한 뒤끝에서 떨어져나간다. 이때 마중각이 있으면 미끈한 웃면을 지나는 공기흐름은 그대로 떨어지지만 아래면을 지나는 흐름은 날개를 감돌면서 시계바늘과 반대방향으로 돌아가는 회리를 만든다.(그림 5-21)

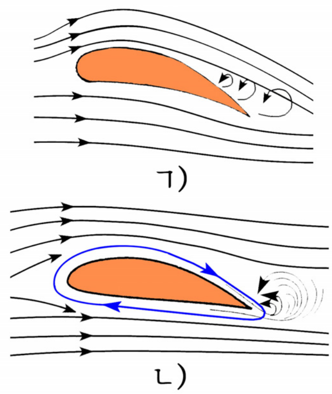


그림 5-21. 비행기날개에서 양력이 생기는 리치

이 회리에 이끌리여 날개주위에는 원통이 돌 때처럼 날개를 따라 시계바늘방향으로 돌아가는 공기의 회전흐름이 생긴다.

이러한 회전흐름의 세기는 마중각이 커질수록 커진다. 이 공기의 회전흐름이 날개를 스쳐지나는 공기흐름과 겹쳐지므로 마중각이 커지는데 따라 날개의 웃면과 아래면에서 속도차가 커지면서 양력도 더 커진다. 그러나 마중각이 어떤 한계를 넘으면 회전흐름의 세기가 작아지므로 양력도 작아진다.

생각하기 비행기가 떠오르거나 내릴 때에는 바람과 반대방향으로 운동한다. 왜 그런가?

해보기

종이원통의 자리길은 어떤 모양을 가지며 왜 그런가?

길이가 15cm정도이고 직경이 3cm정도 되게 종이원통을 만들고 원통에 실을 감아놓는다. 원통을 책상우에 놓고 실의 끝을 수평면과 약간 각을 짓거나 수평으로 빠르게 잡아당긴다.(그림 5-22)

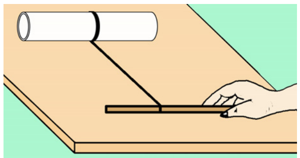


그림 5-22

다음 종이원통의 운동을 자세히 고찰해보면서 생각하여보아라.

자료 수중날개선

배는 비행기에 비하여 많은 짐을 실을수 있다. 그러나 공기에 비하여 물의 저항이 크기때문에 속도가 뜬것이 결함이다. 배밑에 날개를 달면 물속에서 배를 훨씬 빨리 달릴수 있게 할수 있다. 날개달린 배 즉 수중날개선은 앞, 중간에 각각 날개를 설치할수 있다.(그림 5-23)



그림 5-23. 수중날개선

날개는 쭉 펼수도 있고 V자형으로 접을수도 있다. 그리하여 배는 깊은 물에서나 얕은 물에서나 편리하게 다닐수 있다.

물의 밀도는 공기의 밀도보다 약 800배정도 크기때문에 물에서 날개가 받는 양력은 공기속에서 받는 양력에 비해 같은 속도에서는 800배 더 크다. 그러므로 수중날개선의 날개의 결면적은 공기중에서 비행하는 비행기의 날개보다 1/800로 작게 하여도 된다. 수중날개선은 타빈으로 물을 분사할 때 그의 반작용으로 운동하며 물에서 70~140km/h의 속도를 낼수 있다.

수중날개선의 날개의 각도, 날개길이들은 모두 레이다와 콤퓨터 등에 의해 자동조종된다.

문 제

1. 비행기에 달린 보조날개는 어떤 역할을 하는가?
2. 축구선수가 모서리뽈을 어떻게 차면 뽈이 꼴문안으로 《저절로》 들어가겠는가?
3. 탁구공을 걸어치거나 깎아칠 때 공은 어떻게 운동하겠는가? 그림을 그리고 설명하여라.
4. 비행기가 하늘에서 등속직선운동을 할 때 비행기에 작용하는 힘을 따져보아라.

제 5 절. 류체속에서 운동하는 물체가 받는 저항힘

끈기힘(점성힘)

흐르는 물에 나무나 종이를 띄우면 물에 이끌리여 떠내려간다.

? 어떤 힘이 나무나 종이에 작용하겠는가.

벨트콘베아에 실린 광석이 운반되는것은 광석과 벨트콘베아사이에 마찰력이 생기여 광석에 작용하기때문이다. 마찬가지로 흐르는 물에 띄운 나무나 종이가 떠내려가는것도 물과 나무, 물과 종이사이에 마찰력이 생기기때문이다.

이처럼 마찰력은 고체와 고체뿐아니라 고체와 액체, 액체와 액체사이에도 작용한다.

실 험

○ 돌아가는 원판우에 물그릇을 놓고 그우에 자유롭게 돌수 있는 원통을 띄워놓는다.(그림 5-24)

○ 물그릇을 돌리면서 물과 원통의 운동을 살펴본다. 물그릇이 돌아갈 때 물과 원통도 그릇을 따라 돌아간다.

○ 돌리던 물그릇을 멈추면서 물과 원통의 운동을 살펴본다. 물그릇을 멈추면 물과 원통도 그릇을 따라 점차 멎는다.

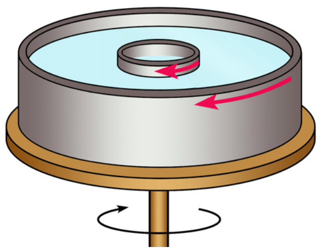


그림 5-24. 물과 원통은 그릇을 따라 돌아간다

그릇이 돌 때 그릇안의 물과 원통이 따라도는것은 그릇과 물, 물과 띄워놓은 원통사이에는 물론이고 물의 층들사이에도 마찰력이 작용한다는것을 보여준다. 즉 류체의 두 층이 서로 다른 속도로 상대적으로 운동할 때(흐를 때) 두 층사이에 마찰력이 생긴다. 이러한 마찰력을 **내부마찰력** 또는 **끈기힘**이라고 부른다.

끈기힘은 류체의 층들사이 그리고 고체와 류체사이에서 서로 운동을 방해하는 힘이며 경계면의 접선방향으로 향한다.

이러한 끈기힘으로 하여 속도가 빠른 류체층은 느린 류체층을 가속시키고 반대로 느린 류체층은 빠른 류체층을 감속시킨다.

? 끈기힘의 크기는 무엇에 관계되는가.

그림 5-24의 실험장치에서 물그릇의 회전속도를 점차 빨리하면서 원통의 운동을 살펴보면 물그릇과 물우에 띄워놓은 원통과의 속도차가 클수록 원통이 더 빨리 끌리워 돌아간다. 실험에 의하면 끈기힘은 서로 가까이에 있는 류체의 두 층의 속도차 $v_1 - v_2$와 맞닿은 면적 S에 비례하고 층들사이의 거리에 거꿀비례한다.(그림 5-25) 즉

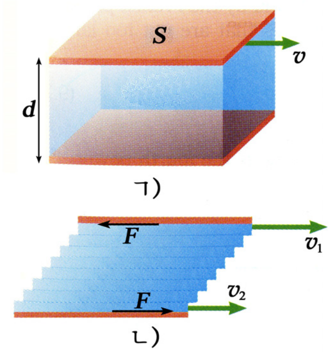


그림 5-25. 끈기힘의 방향

$$F = \eta \frac{v_1 - v_2}{d} S \qquad \text{끈 기 힘}$$

여기서 비례결수 η를 **끈기결수**라고 부른다. 끈기결수는 류체의 종류와 온도에 관계된다. 일반적으로 온도가 높아질 때 액체의 끈기결수는 작아지며 기체의 끈기결수는 커진다.

끈기결수의 단위는 $1\text{N·s/m}^2 = 1\text{Pa·s}$이다. 1Pa·s는 맞닿은 면적이 1m^2, 두 층사이거리가 1m이고 두 층의 속도차(상대속도)가 1m/s인 때 끈기힘이 1N이 되는 류체의 끈기결수와 같다.

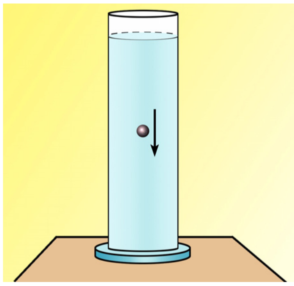
몇가지 류체의 끈기결수

류 체	온도[℃]	끈기결수[Pa·s]	류 체	온도[℃]	끈기결수[Pa·s]
물	0	1.8×10^{-3}	글리세린	20	$1\,500\times10^{-3}$
물	20	1.0×10^{-3}	공 기	20	$0.001\,8\times10^{-3}$
물	100	0.3×10^{-3}	수 소	0	0.009×10^{-3}
에틸알콜	20	1.2×10^{-3}	수증기	100	0.013×10^{-3}

물체가 류체속에서 운동할 때 끈기힘으로 하여 류체로부터 운동을 방해하는 저항을 받는다. 이것을 **끈기저항**이라고 부른다.

? 끈기저항의 크기는 무엇에 관계되겠는가.

그림 5-26과 같은 실험에 의하면 반경이 R인 구가 류체속에서 받는 끈기저항의 크기는 물체의 속도가 크지 않을 때 속도에 비례한다. 즉


그림 5-26. 끈기저항을 알아보는 실험

$$F = 6\pi\eta R v \qquad \text{구가 받는 끈기저항}$$

이것을 **스톡스의 법칙**이라고 부른다.

여기서 비례결수 $\gamma = 6\pi\eta R$ 를 **끈기저항결수**라고 부른다. 끈기저항결수는 물체의 크기와 모양, 류체의 종류에 관계된다.

압력저항

물체가 류체속에서 운동할 때에는 끈기저항만 받겠는가.

물체의 속도가 빨라지면 물체를 스쳐지나는 류체의 흐름속도가 커진다. 류체의 흐름속도가 빨라지면 류체가 물체를 스쳐 흐르다가 떨어질 때 끈기로 하여 물체뒤에 회리가 생긴다.(그림 5-27)



그림 5-27. 회리에 의하여 압력저항이 생긴다

이때 회리가 생기는 물체뒤부분에서 류체의 속도는 더 빨라진다.

그러므로 물체뒤부분에서의 압력은 앞부분에서의 압력보다 작아지며 그 압력차에 의하여 물체는 저항을 받게 된다. 이 저항을 **압력저항**이라고 부른다.

실험에 의하면 압력저항의 크기는 류체의 밀도와 물체의 자름면적, 속도의 두제곱에 비례한다. 즉

$$F_{\text{압}} = \frac{1}{2} c\rho S v^2 \qquad \text{압력저항}$$

자료 공기방석선

배의 속도는 물과 선체사이의 끈기힘으로 하여 크게 할수 없다. 이러한 끈기힘을 작게 만든다면 배의 속도를 크게 할수 있다.

이렇게 만든 배가 공기방석선이다.

공기방석선은 배밑에 달린 공기주머니에 압축공기를 불어넣어 배를 물우에 뜨게 한 후 뒤로 압축공기를 쏘아 물을 밀어주어 이 힘의 반작용으로 앞으로 나간다.(그림 5-28)

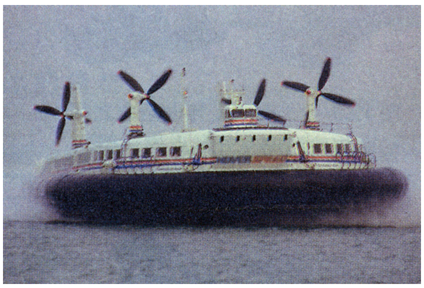


그림 5-28. 공기방석선의 모양

공기방석선은 속도가 빠르고 조종이 간단하여 여러가지 목적에 쓰인다.

※ 공기방석무대는 무대밑에 달린 공기주머니에 압축공기를 불어넣어 무대를 땅에서 띄워놓음으로써 마찰력이 매우 작게끔 만들어 쉽게 움직이도록 만든것이다.

여기서 비례결수 c를 **압력저항결수**라고 부른다. 압력저항결수는 물체의 모양에 관계된다.(그림 5-29)

례를 들어 반경이 r인 구인 때 압력저항결수는 $c=\frac{1}{2}$이다.

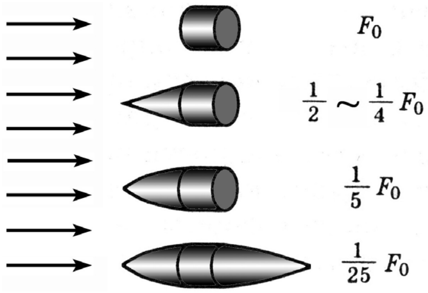
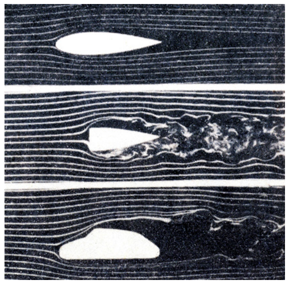


그림 5-29. 물체의 모양에 따르는 압력저항의 크기


그림 5-30. 물체의 모양에 따르는 류선

압력저항을 작게 하려면 어떻게 해야 하는가.

압력저항을 작게 하려면 류체속에서 운동하는 물체뒤에서 회리가 적게 생기도록 물체의 모양을 미끈하고 길게 만들어야 한다.(그림 5-30)

이렇게 만든 물체의 겉모양을 **류선형(흐름선형)**이라고 부른다.

속도가 빠른 물고기들의 몸통과 새의 모양과 날개는 다 류선형으로 되여있으므로 압력저항을 적게 받으면서 운동한다.

속도가 빠른 비행기일수록 더욱 뾰족하고 류선형으로 만든다.

생각하기 그림 5-29와 5-30에서 류선형의 물체는 어느것인가?

물체가 공기속에서 소리속도보다 더 큰 속도로 운동하면 어떤 저항이 생기겠는가?

문 제

1. 락하산을 왜 넓게 펴는가?
2. 적락하산병이 면적이 70m^{2}인 락하산을 펴고 500m 앞에 떨어진다. 적병과 락하산의 총질량은 90kg, 탄알속도는 800m/s라면 어디를 겨누어야 하겠는가? 압력저항결수는 c=1, 공기밀도는 1.29kg/m^{3}이다.
3. 공기속에서 안개방울이 0.12cm/s의 속도로 내려오고있다면 안개방울의 직경은 얼마이겠는가? 공기의 밀도는 1.293kg/m^{3}이고 끈기결수는 1.72×10^{-5}N·s/m^{2}이다.
4. 면적이 0.01m^{2}인 평판 B를 고정평판 A로부터 10^{-3}m만큼 띄우고 그사이에 기름을 채워둔다. 판 B를 0.1m/s의 속도로 판 A에 평행으로 움직일 때 0.3N의 힘이 든다면 기름의 끈기결수는 얼마인가?

5. 물체가 류체속에서 운동할 때 받는 압력저항에 대한 다음 문장에서 옳은것을 판단하고 그 근거를 밝히여라.

ㄱ) 압력저항은 물체의 자름면적과 속도가 클수록 크다.

ㄴ) 압력저항은 물체의 뒤에서 회리가 세게 생길수록 작다.

ㄷ) 압력저항은 류체의 종류에 관계된다.

ㄹ) 압력저항은 류체의 밀도, 물체의 자름면적, 속도가 클수록 크다.

6. 다음 문장의 □안에 알맞는 글 또는 식을 써넣어라.

류체속에서 운동하는 물체의 □가 □ □뒤에서 회리가 생기지 않을 때 □이 기본으로 나타난다. 이 힘의 크기는 물체의 □과 □, □, □에 관계되므로 □로 표시할수 있으며 □의 운동방향과 □으로 향한다.

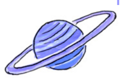


문제: 직승기의 비행원리를 조사하고 설명하여라.

방향: · 문헌들을 조사하여 직승기에서 양력이 어떻게 생기는가를 알아보아라.

· 직승기꼬리부분에 있는 작은 날개가 어떤 역할을 하는가를 알아보아라.

· 직승기가 리륙 또는 착륙 또 방향을 바꾸거나 한자리에 떠있으려면 날개의 회전상태를 어떻게 해야 하는가를 알아보아라.



복습문제

1. 액체의 류선이 그림 5-31과 같다. 여러곳에서 액체의 속도벡토르를 표시하여라.

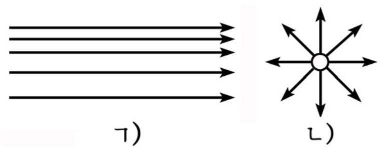


그림 5-31

2. 흙탕물을 퍼내는 뽐프가 1h당 $500m^3$의 흙을 퍼낸다. 흙탕물의 체적이 흙의 체적보다 10배 크다면 직경이 0.6m인 관에서 흙탕물의 속도는 얼마인가?

(답. 4.9m/s)

3. U자형관에 수은을 넣은 다음 왼쪽에는 밀도가 $800kg/m^3$인 알콜을 5cm 높이로 넣고 오른쪽에는 물을 5cm 높이로 넣었다.(그림 5-32) 량쪽 수은면의 높이차는 얼마나 생기겠는가? 수은의 밀도는 $13\,600kg/m^3$이다.

(답. 0.74mm)

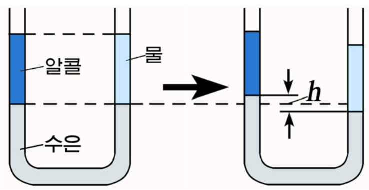


그림 5-32

4. 다음의 □안에 알맞는것을 써넣어라.

밑면의 반경이 r 인 원기둥형의 그릇에 물을 h 만 한 높이로 채웠을 때 물이 밑면에 주는 압력과 힘은 □, □이며 옆면에 주는 평균압력과 힘은 □, □이다. 물이 밑면에 주는 힘과 옆면에 주는 힘이 같게 하려면 물을 채운 높이는 □이여야 한다.

5. 수평방향으로 가속도 a 로 등가속직선운동을 하는 물이 담겨진 그릇이 있다. 액체의 겉면은 어떻게 놓이겠는가? 액체속의 임의의 점에서 압력은 어떻게 되겠는가?(그림 5-33)

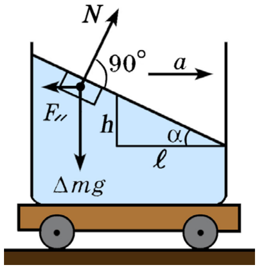


그림 5-33

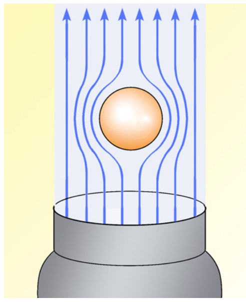
(답. $\tan\alpha = \dfrac{a}{g}$, $P = P_0 + \rho gh = P_0 + \rho a\ell$)

6. 다음의 □안에 알맞는것을 써넣어라.

밀도가 ρ_0인 액체우에 떠있는 질량이 m_1, 밀도가 ρ_1인 통나무우에 질량이 m_2인 물체를 놓았다. 이때 통나무가 완전히 잠기여 떠있다면 통나무가 받는 뜰힘은 □이고 통나무와 물체에 작용하는 전체 중력은 □이다. 이때 □의 관계가 성립한다. 그러므로 통나무만 완전히 잠기여 떠있게 하려면 통나무의 질량과 물체의 질량의 비는 □이여야 한다. 액체가 물이고 통나무의 밀도가 $\rho = 600\text{kg/m}^3$라면 $\dfrac{m_1}{m_2}$=□이다.

7. 밀도가 $\rho_1 = 500\text{kg/m}^3$인 나무로 만든 구가 물속에서 가벼운 용수철에 련결되여 떠있다. 만일 공기중에서 구를 드리웠을 때 용수철이 $x_1 = 1\text{cm}$만큼 늘어난다면 물속에서 용수철은 얼마만큼 늘어나겠는가? 용수철의 체적은 무시하며 물의 밀도는 $\rho_2 = 10^3\text{kg/m}^3$이다.

(답. 1cm)


그림 5-34

8. 드림선우로 움직이는 공기흐름으로 탁구공을 띄웠다. 탁구공을 조금 옆으로 밀어주면 공은 어떻게 되겠는가?(그림 5-34)

9. 가마안에 뜨거운 물과 10MPa의 수증기가 꽉 차있다. 가마밑에 수평으로 뺀 관이 갑자기 열리면 물은 어떤 속도로 흘러나오겠는가? 관우의 물의 높이는 고려하지 않는다. (답. 140.7m/s)

10. 저수지의 물이 물면으로부터 h 만 한 깊이에서 흘러나와 발전기의 수차를 돌린다.(그림 5-35)

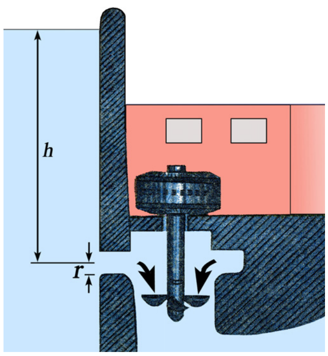


그림 5-35

ㄱ) 관의 내경이 $2r$ 라면 1s마다 얼마만한 물이 나오는가?

ㄴ) 수차의 효률이 η 라면 발전기의 출력은 얼마인가?

(답. ㄱ) $Q = \rho\pi r^2\sqrt{2gh}$, ㄴ) $P = \sqrt{2}\eta\rho\pi r^2(gh)^{3/2}$)

11. 높이가 ℓ 인 원통에 물이 꽉 차있다. 원통의 옆벽에 작은 구멍을 내고 여기서 뿜어나오는 물줄기가 수평면에서 원통으로부터 제일 먼곳에 이르게 하려면 구멍의 높이를 얼마로 해야 하겠는가?(그림 5-36)

(답. $h=\frac{\ell}{2}$)

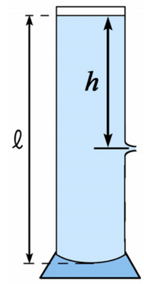


그림 5-36

12. 액체가 흐르는 관이 있다. 굵은 부분과 가는 부분의 자름면적이 각각 S_A, S_B 이고 이곳들에 세운 기둥속의 액체기둥의 높이차가 h 라면 매 1s마다 관을 지나는 액체의 량은 얼마인가?(그림 5-37)

(답. $m=\rho S_A S_B\sqrt{\frac{2gh}{S_A^2-S_B^2}}$)

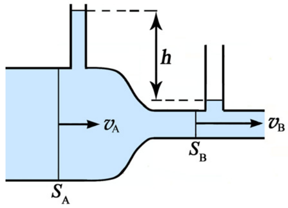


그림 5-37

13. 수도꼭지를 틀어 물줄기를 내뿜었다. 수도의 출구에서와 그로부터 ℓ 만큼 아래에서 물줄기의 직경을 재였더니 각각 d_1, d_2 이였다. 시간이 t 만큼 지나면 얼마만한 체적의 물이 흘러나오겠는가?(그림 5-38)

(답. $V=\frac{1}{4}\pi d_1^2 d_2^2 t\sqrt{\frac{2g\ell}{d_1^4-d_2^4}}$)

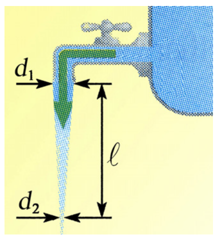


그림 5-38

14. 탁구공에서는 마그누스효과가 잘 나타나지만 철구에서는 거의 나타나지 않는다. 왜 그런가?

15. 비방울은 수백m의 높이에서 떨어져도 대체로 땅겉면가까이에서는 2~7m/s의 속도로 고르롭게 떨어진다. 왜 그런가?

16. 모양이 같아도 밀도가 큰 물체가 공기중에서 빨리 떨어진다. 왜 그런가?

17. 자동차가 직선수평길을 따라 일정한 속도로 달리고있다. 속도를 2배, 3배로 크게 하려면 발동기의 출력(일능률)을 얼마나 크게 해야 하는가? 저항이 속도에 비례하는 경우와 속도의 2제곱에 비례하는 경우를 갈라서 설명하여라.

18. 강물의 속도는 기슭에서보다 복판에서 더 크다. 왜 그런가?

19. 수평으로 놓인 두 평행평판사이에 $+q$ 인 전기량을 띤 작은 기름방울이 있다. 기름방울의 반경은 r, 밀도는 ρ_1 이며 공기의 끈기결수는 η, 밀도는 ρ 이다.

ㄱ) 극판사이에 전기마당이 없을 때 기름방울은 일정한 속도 v_0 으로 떨어진다. 기름방울의 반경을 g, η, ρ, ρ_1, v_0 으로 이끌어내여라.

ㄴ) 극판사이에 세기가 E 인 전기마당(웃극판 +, 아래극판 −)을 걸어주었을 때 기름방울은 일정한 속도 v 로 떨어진다. 기름방울이 띤 전기량을 η, r, E, v, v_0 으로 표시하여라.

(답. ㄱ) $r=3\sqrt{\frac{\eta v_0}{2(\rho_1-\rho)g}}$ ㄴ) $q=\frac{6\pi\eta r(v-v_0)}{E}$)

제 6 장. 강체의 운동

우리 주위에서 자주 볼수 있는 가위나 지레대, 나사틀개와 같은 물체들은 힘을 받아도 그 모양이 거의 변하지 않는다. 이와 같이 힘의 작용을 받아도 변형되지 않는다고 볼수 있는 어떤 크기를 가진 굳은 물체를 **강체**라고 부른다.

강체에 대한 힘작용효과와 강체의 운동은 질점과는 달리 실제적인 물체와 류사하게 나타난다. 따라서 강체의 운동에 대한 지식은 실천에서 물체의 운동을 해결하는데서 매우 중요하다.



제 1 절. 강체의 병진운동과 회전운동

강체의 운동은 일반적으로 병진운동과 회전운동의 합운동으로 된다.(그림 6-1)

병진운동

유원지의 대관람차나 짐을 나르는 삭도에서 바구니의 운동을 보자. 회전대나 지지기둥에 대한 바구니의 운동은 복잡해보인다.(그림 6-2)

그러나 바구니에 있는 어떤 두 점을 이은 직선만을 주시하면 이 직선이 늘 평행으로 옮겨간다.

이와 같이 강체안에 그어놓은 선분이 강체의 운동과정에 방향을 바꾸지 않고 항상 평행으로 이동할 때 이 운동을 강체의 **병진운동**이라고 부른다.

병진운동하는 강체에서는 강체안의 모든 점들이 나란히 옮겨가므로 매 점들의 자리길모양과 변위가 같으며 속도, 가속도가 같다.(그림 6-3)

그러므로 강체의 병진운동을 살필 때에는 어느 한 점의 운동만을 보면 된다. 흔히 이러한 점을 중력중심으로 잡으면 강체의 병진운동을 질점의 운동과 같이 고찰할수 있다.

그림 6-1과 같이 막대기의 운동이나 나사틀개의 운동은 매우 복잡하지만 어느 한 점만은 포물선자리길을 그린다. 이 점에 물체의 전체 질량이 집중되여있다고 보면 일정한 크기를 가진 물체의 운동을 질점의 운동으로 표시할수 있다. 이 점을 **질량중심**이라고 부른다.

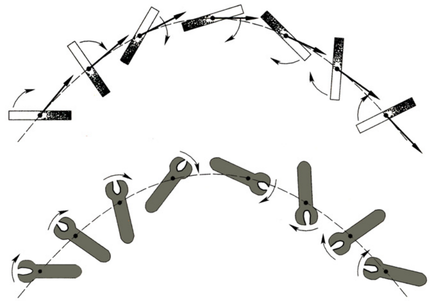


그림 6-1. 던져진 막대기와 나사틀개의 운동



그림 6-2. 대관람차

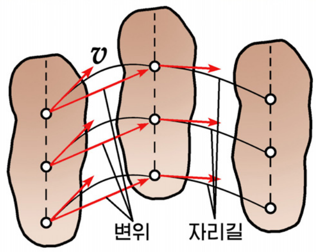


그림 6-3. 물체의 병진운동

❓ 질량중심의 자리표는 어떻게 표시할수 있는가.

질량이 각각 m_1, m_2인 두 질점이 서로 ℓ만한 거리에 놓여있는 계에서 질량 $M=m_1+m_2$이 집중된 질량중심 C_M의 자리표를 구하자.(그림 6-4)

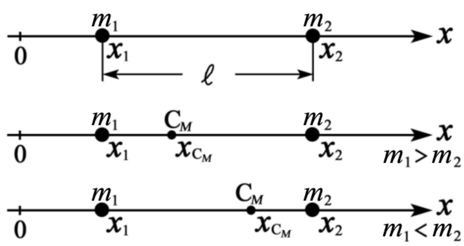


그림 6-4. 두 질점계의 질량중심

$x_2 - x_1 = \ell$ 이므로 $$x_{C_M} = x_1 + \frac{m_2 \ell}{m_1 + m_2}$$

로 된다. 질량중심은 두 질점을 련결하는 직선우에 놓이는데 질량이 같으면 중간점에 놓이고 질량이 다르면 큰쪽에 쏠린다.

계가 여러개의 질점으로 이루어졌을 때의 질량중심의 자리표는 다음과 같이 표시된다.

$$x_{C_M} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \cdots + m_n x_n}{M} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i x_i}{M}$$

질점들이 평면에 분포되였으면 x, y 값을, 공간에 분포되였으면 x, y, z값을 구하면 된다. 이런 의미에서 질량중심은 계에서의 질량분포중심이다.

※ 질량중심과 류사한 개념이 중력중심이다. 중력가속도가 모든 점에서 갈다고 볼수 있는 공간에서 물체의 중력중심은 질량중심과 일치한다.

회전운동

선풍기날개와 자전거바퀴의 운동, 팽이의 돌기운동과 전동기회전자의 운동처럼 강체의 모든 점들이 어떤 축둘레에서 원자리길을 그리는 운동을 **회전운동**이라고 부른다.

회전축은 전동기에서처럼 고정될수도 있고 자전거에서처럼 이동할수도 있다.

고정된 회전축둘레에서 회전운동. 강체가 회전할 때 매 점들이 옮겨간 거리가 다르므로 매 점의 선속도가 다르다.(그림 6-5)

그러나 강체가 고정된 회전축주위에서 돌아간 각은 매 점들에서 갈다. 그러므로 강체의 회전운동을 회전각과 각속도, 각가속도로 표시하면 훨씬 편리하다.

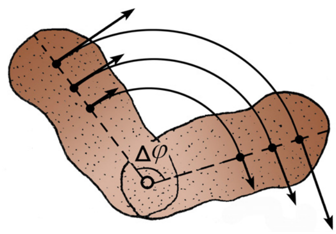


그림 6-5. 매 점이 돌아간 각이 같으므로 각속도, 각가속도는 다같다

각속도가 시간에 따라 커지거나 작아지는 운동에서 단위시간동안에 생긴 각속도의 변화량은 각가속도로 표시한다.

시간 Δt 사이에 각속도의 크기가 $\Delta\omega$ 만큼 변하였다면 각가속도는 $\beta = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ 로 된다.

회전운동하는 강체의 모든 점에서 회전각과 각속도, 각가속도는 다같다. 따라서 강체의 한 점의 회전운동을 알면 그 전체 운동을 알수 있다.

? 강체의 회전운동에서 회전축과 회전방향을 어떻게 표시하면 편리하겠는가.

강체는 시계바늘의 방향과 같은 방향으로 혹은 반대방향으로 돌수 있다.

강체의 회전운동을 우리가 자주 보는 오른나사의 운동과 비교하여 표시한다.

강체가 회전하는 방향으로 오른나사를 돌릴 때 나사의 전진방향을 회전축의 방향으로 정하고 그 방향을 각속도 $\vec{\omega}$의 방향으로 약속한다.(그림 6-6)

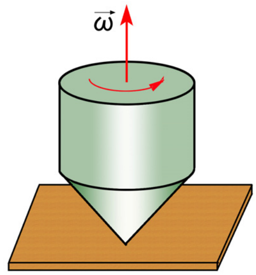


그림 6-6. 팽이의 회전운동과 각속도의 방향

고정축둘레로 회전하는 강체의 모든 점에서 선속도는 다르지만 각속도는 다같다. 그러므로 각속도를 알면 강체의 모든 점에서 선속도를 구할수 있다.(그림 6-7)

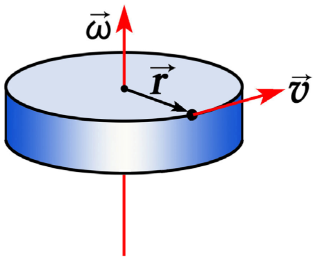


그림 6-7. 회전하는 물체의 임의의 점의 속도

각속도가 시간에 따라 변하는 경우에 각속도의 변화를 나타내는 각가속도는 부호를 가지며 어떤 방향의 회전운동이 빨라지는가 떠지는가를 나타낸다. 실례로 $\omega>0$, $\beta>0$이면 강체가 시계바늘과 반대방향으로 돌면서 회전이 빨라진다는것을 의미한다.

회전축이 한 평면에서 이동하는 강체의 회전운동. 수평길로 굴러가는 바퀴의 임의의 한 점의 운동을 살펴보자. 바퀴의 회전축은 수평으로 이동한다.(그림 6-8)

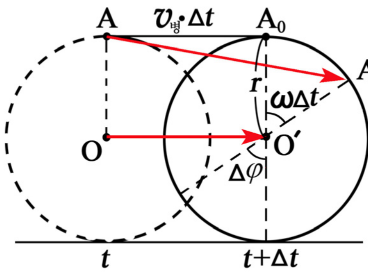


그림 6-8. 수평으로 굴러가는 바퀴의 한 점의 운동

Δt 시간동안에 점 A가 A′로 넘어간다.

점 A의 변위 $\overrightarrow{AA'}$를 두가지 운동으로 나누어보자. 즉 바퀴전체가 거리 $v_{병}\cdot\Delta t$만큼 옮겨가는 병진운동으로 하여 생긴 변위 $\overrightarrow{AA_0}$과 회전축주위로 각 $\Delta\varphi=\omega\cdot\Delta t$만큼 회전운동하는것으로 하여 생긴 변위 $\overrightarrow{A_0A'}$의 합으로 볼수 있다. 따라서 점 A의 속도 $\vec{v}_A$는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\vec{v}_A=\frac{\overrightarrow{AA'}}{\Delta t}=\frac{\overrightarrow{AA_0}}{\Delta t}+\frac{\overrightarrow{A_0A'}}{\Delta t}=\vec{v}_{병}+\vec{v}_{회}$$

이처럼 <u>바퀴가 굴러가는 운동을 질량중심의 병진운동과 질량중심둘레의 회전운동의 합으로 볼수 있다.</u>

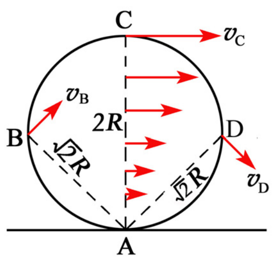


그림 6-9. 순간회전중심

한편 다른 형식으로 생각하면 바퀴가 수평길우에서 미끌지 않고 굴러갈 때 매 순간에 멎어있는 점은 땅에 닿은 점이다.

그러므로 바퀴가 굴러가는 운동은 매 순간에 바퀴가 땅에 닿은 점을 순간회전중심으로 하여 일어나는 회전운동의 련속으로 볼수 있다.(그림 6-9)

순간회전중심점으로부터 먼 거리에 있는 점들일수록 선속도가 더 크다. 그러므로 순간회전중심만 찾으면 강체의 임의의 점들에서의 속도벡토르의 분포를 한눈에 알아볼수 있다.

순간회전중심을 강체의 어떤 두 점의 속도벡토르들에 대한 수직선들의 사귐점으로 구할수 있다.

생각하기 그림 6-10을 보면서 반경이 R인 바퀴가 속도 v로 수평길로 굴러갈 때 테두리의 네 점 A, B, C, D의 속도를 대비하여보아라.

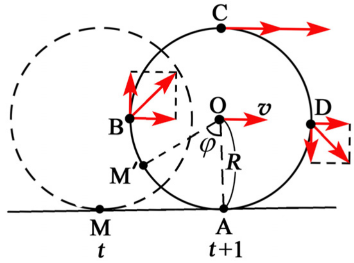


그림 6-10. 바퀴가 굴러갈 때 때 점들의 속도변화

문 제

1. 지구—달로 된 계의 질량중심은 지구로부터 얼마의 거리에 있는가?
2. 지구의 자전각속도와 공전각속도를 구하여라. 지구중심이 얼마만한 선속도로 운동하는가?
3. 멎어있던 타빈이 등가속회전하여 2min동안에 각속도가 8 000rad/min에 이르렀다. 얼마만한 각가속도로 돌았겠는가?
4. 전동기가 4 000min^{-1}의 회전수로 돌다가 스위치를 열자 8s만에 멎었다. 각가속도와 스위치를 열어놓은 때로부터 회전한 수를 구하여라.

제 2 절. 강체의 평형

높이 솟은 탑이나 다리 등은 여러가지 힘을 받고있으나 멎어있다. 이것을 흔히 평형상태라고 한다.

그러면 일정한 속도로 돌아가는 전동기의 회전자의 운동이나 수평인 철길을 등속으로 달리는 전기기관차의 바퀴의 운동도 평형상태인가.

강체가 여러가지 힘을 받아도 병진운동상태와 회전운동상태가 변하지 않는 현상을 **강체의 평형**이라고 부른다.

강체의 평형조건

강체에 그의 질량중심을 지나는 선을 따라 힘을 주면 어떤 효과가 일어나겠는가.

실험

매끈한 책상우에 놓여있는 두툼한 책에 힘을 주어보자.(그림 6-11)

○ 책의 대각선(질량중심을 지나는 선)방향으로 힘을 주면 책은 그 방향으로 병진운동한다.

○ 힘의 작용점을 대각선(힘작용선)우에서 옮기자. 같은 효과가 나타난다.

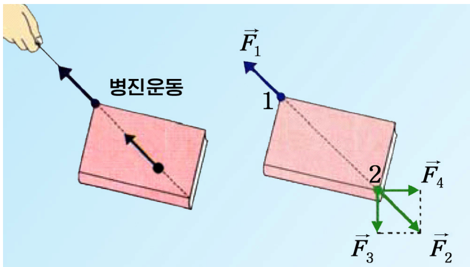


그림 6-11. 책의 병진운동

○ 대각선방향으로 같은 크기의 두 힘을 반대로 준다. 책은 멎어있다.

대각선방향으로 같은 크기의 두 힘을 반대로 줄 때 책이 멎어있으면 이때 한 힘은 다른 힘에 대하여 비기는 힘이다.

$$\vec{F}_1+\vec{F}_2=0$$

다른 두 힘 $\vec{F}_3$과 $\vec{F}_4$가 책의 점 2에 동시에 작용할 때 두 힘의 합력이 $\vec{F}_2$과 같은 효과를 나타내면 책은 멎어있다.

강체에 작용하는 여러 힘들의 작용선들이 한 점에서 사귈 때 강체가 평형상태를 유지하려면 전체 힘들의 벡토르합이 령이여야 한다.

$$\vec{F}_1+\vec{F}_2+\cdots+\vec{F}_n=\sum_{i=0}^{n}\vec{F}_i=0$$

등속직선운동을 하고있던 책에 $\sum\vec{F}_i=0$ 인 여러 힘들이 작용하여도 책의 운동상태는 변하지 않는다.

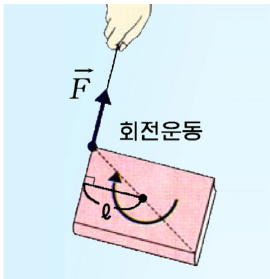


그림 6-12. 책의 회전운동

강체에 질량중심을 지나지 않는 선을 따라 힘을 주면 어떤 효과가 있겠는가.

책상우에 놓인 두터운 책에 대각선과 각을 지은 방향으로 임의의 점에 힘을 주면 책은 회전한다.(그림 6-12) 이러한 회전운동정도는 힘의 크기 F와 힘의 팔 ℓ을 곱한 값인 힘모멘트 M에 관계된다.

회전축이 있는 강체에 힘이 작용할 때 멎어있게 하거나 일정한 회전운동을 유지하게 하려면 크기가 같고 방향이 반대인 힘모멘트를 주어야 한다.(그림 6-13)

$$\vec{M}_1=-\vec{M}_2,\quad \vec{M}_1+\vec{M}_2=0$$

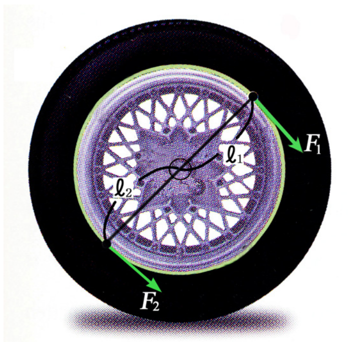


그림 6-13. 바퀴에 작용하는 방향이 반대인 두 힘모멘트

마찬가지로 여러개의 힘이 작용할 때에도 힘모멘트들의 합이 령이면 평형상태가 실현된다.

$$\vec{M}_1+\vec{M}_2+\cdots+\vec{M}_n=0$$

따라서 강체의 평형상태를 실현하기 위한 조건은 다음과 같다.

첫째로, 강체에 작용하는 힘들의 합력이 령이여야 한다.

$$\vec{F}=\vec{F}_1+\vec{F}_2+\cdots=\sum\vec{F}_i=0$$

이 식을 성분별로 표시하면 다음과 같다.

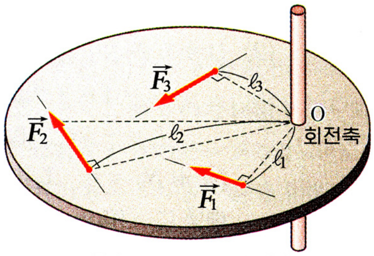
$$F_x=F_{1x}+F_{2x}+F_{3x}+\cdots=0$$

$$F_y=F_{1y}+F_{2y}+F_{3y}+\cdots=0$$

둘째로, 강체의 임의의 점에 작용하는 힘모멘트들의 합이 령이여야 한다.(그림 6-14)

$$\vec{M}=\vec{M}_1+\vec{M}_2+\cdots=\sum\vec{M}_i=0$$

이상의 두 조건을 **강체의 평형조건**이라고 부른다.



$M_1=-F_1\ell_1,\ M_2=-F_2\ell_2,\ M_3=F_3\ell_3$
$M_1+M_2+M_3=0$

그림 6-14. 강체에 작용하는 여러 힘들

강체에 작용하는 힘의 환산

? 강체에 작용하는 여러 힘들의 작용선들이 한 점에 놓이지 않을 때 매 힘들을 계산하기 편리한 힘으로 바꿀수 없겠는가.

강체의 점 O에 힘 $\vec{F}_1$이 작용할 때(그림 6-15) 점 O′에 힘 $\vec{F}_1$과 크기와 방향이 같은 힘 $\vec{F}_1'$, 그와 비기는 힘 $-\vec{F}_1'$를 보태여주자.

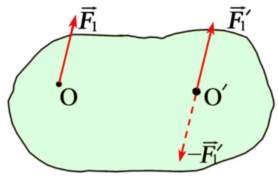


그림 6-15. 힘의 첨가원리

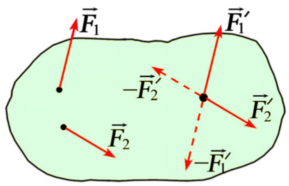


그림 6-16. 강체에 작용하는 여러가지 힘

이 두 힘은 비기는 힘이므로 강체의 평형에 아무런 영향도 주지 않는다.

이때 $\vec{F}_1$, $-\vec{F}_1'$는 짝힘이 된다. 따라서 점 O에 작용하는 힘 $\vec{F}_1$의 작용효과는 짝힘 $\vec{F}_1$, $-\vec{F}_1'$와 힘 $\vec{F}_1'$의 작용으로 바뀌운다.

그런데 점 O′는 임의의 점이므로 강체의 질량중심에 정할수도 있다. 점 O′를 강체의 질량중심에 정하면 힘 $\vec{F}_1$의 작용효과를 짝힘 $\vec{F}_1$, $-\vec{F}_1'$의 회전운동효과와 강체의 질량중심에 작용하는 힘 $\vec{F}_1'$의 병진운동효과로 바꾸어 평가할수 있다. 이런 방법으로 강체의 여러곳에 작용하는 많은 힘을 임의의 한곳(실례로 질량중심)에 작용하는 힘 $\sum\vec{F}_i'$와 짝힘 $\sum\vec{F}_i$, $-\sum\vec{F}_i'$의 모멘트 $\sum M_i$로 바꿀수 있다.(그림 6-16)

해보기

- 그림 6-17과 같이 물체를 한쪽으로 당기여 고정시키려면 수평으로 얼마의 힘을 주어야 하는가를 계산하고 실험으로 확정하여보아라.
- 그림 6-18과 같은 권양기의 큰 바퀴에 주는 힘은 얼마인가를 구하여보아라.

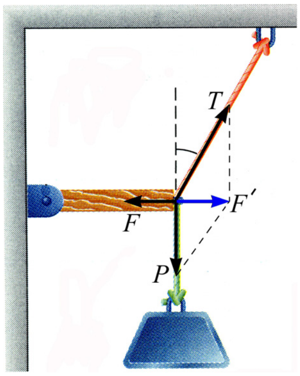


그림 6-17. 평형상태의 실현

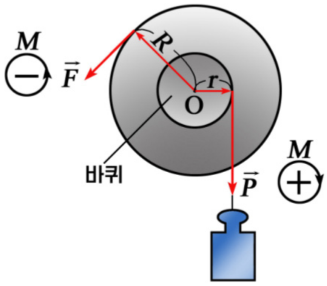


그림 6-18. 평형상태에 있는 권양기에 작용하는 힘

[례제] 전주대에 막대기를 수평으로 대고 그끝에 무게가 P인 짐을 매달았다. 버팀줄 BC의 길이는 ℓ이고 줄과 막대기가 이루는 각은 α이다. 줄이 당기는 힘과 전주대가 막대기를 미는 힘을 구하여라.(그림 6-19)

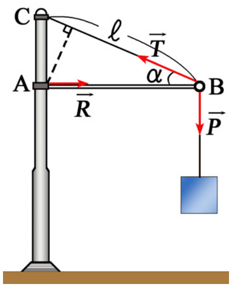


그림 6-19

풀이. 주어진것: 짐의 무게 P

버팀줄의 길이 ℓ

버팀줄과 수평막대기사이각 α

구하는것: T?, R?

강체의 평형조건을 리용하면

$$\sum F_i = 0 \quad \rightarrow \quad R - T\cos\alpha = 0$$

$$\sum M_i = 0 \quad \rightarrow \quad T \cdot \ell\cos\alpha\sin\alpha - P\ell\cos\alpha = 0$$

웃식에서 필요한 힘을 구한다.

$$T = \frac{P}{\sin\alpha}, \qquad R = P\cot\alpha$$

문제

1. 늘어나지 않는 실에 두 물체를 매달아 실이 드림선과 45°를 이루었다. 물체 1의 무게가 4N이라면 물체 2의 무게와 실의 장력은 얼마인가?(그림 6-20)

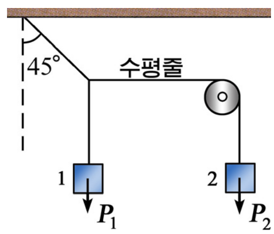


그림 6-20

2. 한끝이 수평축둘레로 돌수 있는 보의 끝에 1 500N의 짐이 드리워있다. 보의 무게는 1 000N이다. 쇠바줄로 보의 B점을 수평으로 당겨 평형을 이루고있다. 이때 보가 드림선과 $\alpha=30°$의 각을 이루고있고 OA=8m, OB=5m이다. 쇠바줄의 장력을 구하여라.(그림 6-21)

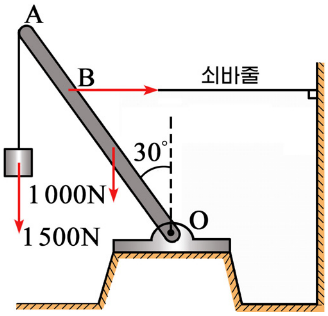


그림 6-21

제 3 절. 각운동량과 관성모멘트

각운동량

강체의 운동을 연구할 때 병진운동을 속도로 표시하고 회전운동을 각속도로 표시하는것이 편리하다.

질점의 운동을 표시하는 운동량과 같이 강체의 회전운동을 편리하게 표시하는 량은 없겠는가.

어떤 점 O주위로 질량이 m인 질점이 원자리길을 따라 돌아가는 운동을 보자.

물체가 반경이 r인 원자리길을 따라 운동할 때 운동량 mv에 반경이 들어있는 량 rmv를 생각할수 있다.

질점이 어떤 점 O둘레로 임의의 자리길을 따라 돌 때 운동량 P에 팔의 길이 $r_\perp$를 곱한 량

$$L=r_\perp P=r_\perp mv$$

를 점 O에 대한 질점의 **각운동량**이라고 부른다.

운동량이 벡토르량인것처럼 각운동량도 벡토르량이다.(그림 6-22)

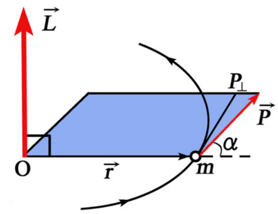


그림 6-22. 질점의 각운동량

각운동량 $\vec{L}$의 방향은 $\vec{r}$와 $\vec{P}$가 만드는 평면에 수직이며 $\vec{r}\to\vec{P}$로 오른나사를 돌릴 때 나사가 나가는 방향이다.

질점의 각운동량의 크기는 $rP\sin\alpha=rP_\perp$이다.

원운동에서는 $r\perp P$이므로 $L=rP$인데 이 식을 변형시키면 다음과 같다.

$$L=rP=rmv=rm\omega r=mr^2\omega$$

그림 6-22에서 알수 있는것처럼 $\vec{L}$의 방향과 $\vec{\omega}$방향은 일치한다.(mr^2은 스칼라량이다.)

※ r^2은 같은 방향으로 향하는 같은 크기의 두 벡토르를 곱한것이므로 스칼라량으로 된다.

따라서 질점의 원운동에서 각운동량 $\vec{L}$은 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{L}=mr^2\vec{\omega}\qquad \text{질점의 각운동량}$$

두개의 질점으로 이루어진 계(아령모양)의 각운동량을 구하여보자.(그림 6-23)

계의 각운동량은 두 질점의 각운동량을 합한것과 같다. 이때 계에서 두 질점의 각속도는 같다.

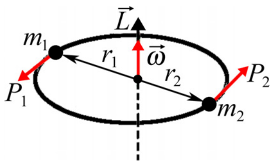


그림 6-23. 두 질점계의 각운동량

$$\vec{L}=\vec{L}_1+\vec{L}_2=m_1r_1^2\vec{\omega}+m_2r_2^2\vec{\omega}=(m_1r_1^2+m_2r_2^2)\vec{\omega}$$

임의의 강체의 각운동량은 어떻게 결정하겠는가.

강체는 여러개의 질점들의 모임으로 볼수 있으므로 강체의 각운동량은 이 질점들의 각운동량을 합한것으로 표시할수 있다.(그림 6-24)

i번째 질점의 질량을 Δm_i, 반경을 r_i, 운동량을 P_i라고 하면 강체의 각운동량의 크기는 다음과 같다.

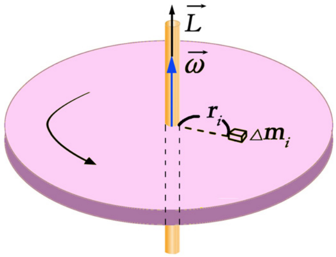


그림 6-24. 강체의 각운동량

$$L=\sum L_i=\sum r_i\times P_i=(\sum \Delta m_i r_i^2)\omega$$

$$L=(\sum \Delta m_i r_i^2)\omega \quad \textbf{강체의 각운동량}$$

전동기나 타빈의 회전자처럼 강체가 회전축둘레로 회전하는 경우에 각운동량의 방향은 각속도의 방향과 일치하며 크기는 각속도의 값에 비례한다.

강체의 각운동량을 여러 성분으로 분해할수도 있다.

$$\vec{L}=\vec{L}_x+\vec{L}_y+\vec{L}_z$$

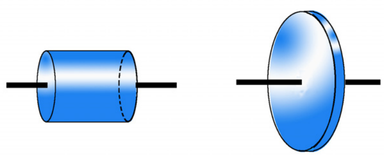
관성모멘트

물체의 회전운동이 어떤 경우에 더 오래동안 진행되는가를 보자.

실험

○ 질량이 같은 긴 원기둥모양의 물체와 원판모양의 물체를 동일한 각속도로 돌리다가 놓아두자.(그림 6-25)

○ 어느것이 더 오래동안 회전하는가를 재여보자. 같은 조건에서 원판모양의 물체가 훨씬 더 오래동안 돌아간다.


그림 6-25. 원기둥과 원판의 회전운동비교

이것은 강체의 회전관성은 질량만으로 결정되는것이 아니라 강체의 모양 즉 질량분포에도 관계된다는것을 보여준다.

이러한 특성을 어떤 량으로 표시하겠는가.

강체의 각운동량공식 $L=(\sum \Delta m_i \cdot r_i^2)\omega$에서 요소질량 Δm_i의 회전반경 r_i가 클수록 각운동량이 커진다. 원판은 원기둥에 비하여 반경이 더 크므로 량 $\sum \Delta m_i \cdot r_i^2$이 더 크다.

이 량이 크면 강체는 오래동안 돌아가므로 이것이 강체의 회전관성을 나타낸다고 볼수 있다. 그러므로 이 량을 **관성모멘트**라고 부르며 문자 I로 표시한다.

$$I = \sum \Delta m_i \cdot r_i^2 \qquad \text{관성모멘트}$$

관성모멘트의 단위는 $1\text{kg}\cdot\text{m}^2$이다.

강체의 관성모멘트는 질량이 회전축으로부터 멀리 떨어져있을수록 크다.

따라서 강체의 관성모멘트는 강체안에서 회전축의 자리에 따라 달라진다.(그림 6-26)

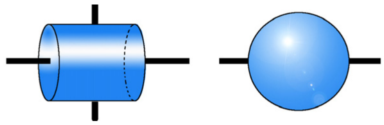


그림 6-26. 원기둥과 구모양강체의 관성모멘트

긴 원기둥모양의 강체의 관성모멘트의 크기는 원기둥축에 대하여 제일 작고 그에 수직인 축에서 제일 크다.

구모양의 강체에서는 중심을 지나는 회전축을 어느 방향으로 정하여도 질량분포모양이 같으므로 관성모멘트는 같다.

관성모멘트는 회전축을 질량중심으로부터 d만큼 평행으로 옮기면 질량중심을 지나는 회전축에 대한 관성모멘트보다 md^2만큼 커진다. 이것을 **슈타이너의 정리**라고 부른다.

$$I = I_C + md^2 \qquad \text{슈타이너의 정리}$$

관성모멘트에 의하여 강체의 각운동량을 표시하면 다음과 같다.

$$\vec{L} = I\vec{\omega} \qquad \text{강체의 각운동량}$$

자료 강체의 관성모멘트

관성모멘트는 질량중심을 지나는 회전축에 대하여 질량이 어떻게 분포되여있는가에 관계되므로 모양에 따라 다르다.(그림 6-27)

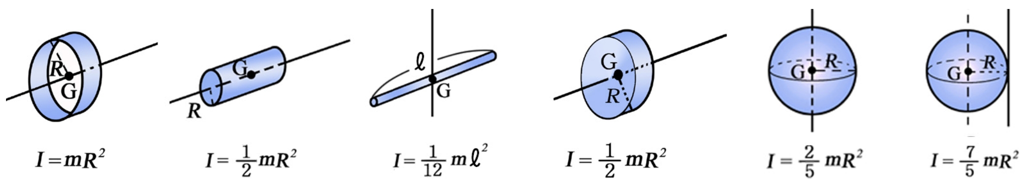


그림 6-27. 여러가지 기하학적모양의 강체의 관성모멘트

직선운동에서 운동량의 공식 $\vec{P}=m\vec{v}$ 와 비교하면 관성모멘트 I 는 회전운동에서 회전관성의 역할을 한다.

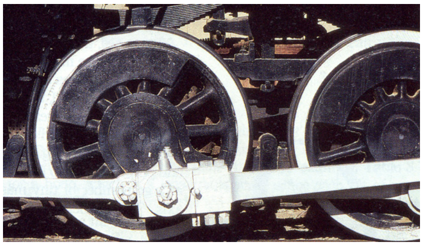


그림 6-28. 관성바퀴

관성모멘트가 크면 강체의 회전속도가 잘 변하지 않는다. 돌을 마스는 파쇄기나 압연로라를 돌려주는 전동기에는 크고 육중한 관성바퀴가 달려있어 저항힘을 받아도 거의 고르롭게 돌아간다.(그림 6-28)

이러한 관성바퀴를 증기기관차, 절단기, 단조기들에서도 리용한다.

문 제

1. 길이가 $\ell=1$m인 막대기의 끝에 질량이 m_1=2kg, m_2=8kg인 두개의 구가 붙어있는 아령모양의 물체가 있다. 구들을 질점으로 보고 막대기의 질량을 무시할 때 다음의 점을 지나면서 막대기에 수직인 축에 대한 관성모멘트를 계산하여라.

   ㄱ) 질량이 m_1인 구　　　　ㄷ) 계의 질량중심

   ㄴ) 질량이 m_2인 구　　　　ㄹ) 막대기의 중심

2. 길이가 ℓ, 질량이 m인 고르로운 막대기가 있다. 막대기와 수직이고 그의 중심을 지나는 축에 대한 관성모멘트는 $m\ell^2/12$이다. 막대기의 끝을 지나며 그에 수직인 축에 대한 관성모멘트를 구하여라.

3. 크기와 질량이 같은 원기둥모양의 알루미니움과 동에서 속이 빈것을 가려보는 원리를 설명하여라. 알루미니움원기둥은 속이 차고 동원기둥은 속이 비였으며 같은 색갈을 칠하였다.

제 4 절. 강체의 회전운동방정식

회전축이 고정된 강체의 회전운동방정식

전동기를 기동시키거나 수차를 돌리기 시작할 때 어떻게 하면 회전속도가 더 빨리 커지겠는가.

자전거의 뒤바퀴를 들고 바퀴살의 여러곳에 힘을 주어 돌려보면 축으로부터 힘의 작용점이 멀리 있을수록 회전속도가 더 빨리 커진다.(그림 6-29)

강체의 회전속도가 어느때에 빨리 커지는가를 반경이 서로 다른 두 원판을 맞붙인 권양기에서 실험으로 알아보자.

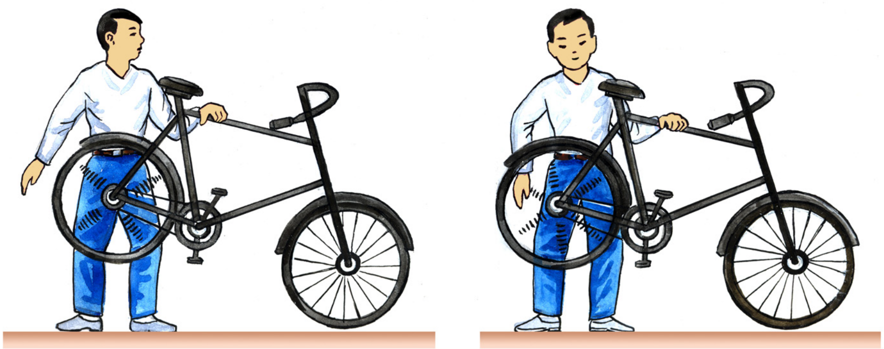


그림 6-29. 자전거바퀴를 돌린다

실험

○ 반경이 서로 다른 도르래를 한 축에 고정시킨 권양기에 여러가지 힘모멘트를 주면서 각가속도를 측정하자.(그림 6-30)

○ 질량이 m인 물체를 반경 R인 도르래에 실로 감은 경우와 반경 r인 도르래에 감은 경우에 땅에 닿는 시간을 재여 각가속도 β를 잰다.

물체를 반경이 큰 도르래에 걸어놓으면 각가속도가 크고 무거운 물체를 걸면 각가속도가 크다.

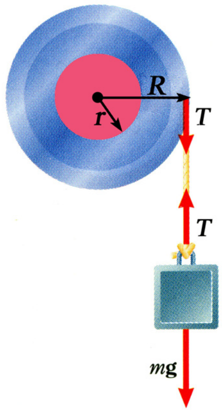


그림 6-30. 바퀴의 각가속도와 힘모멘트사이 관계

실험값을 따져보면 권양기가 회전할 때 각가속도 β는 그에 작용하는 힘모멘트에 비례한다.

$$\beta \sim M \qquad (1)$$

만일 권양기에 반경이 같은 원판을 덧붙이여 관성모멘트를 크게 하면서 각가속도 β를 측정하여보자. 같은 힘모멘트를 주어도 관성모멘트가 크면 각가속도 β가 작아진다. 실험자료에 의하면 각가속도 β는 강체의 관성모멘트에 거꿀비례한다는것을 알수 있다.

$$\beta \sim \frac{1}{I} \qquad (2)$$

식 1과 2를 종합하여보면 회전운동하는 강체의 각가속도에 대한 식을 뉴톤의 운동법칙처럼 표시할수 있다. 고정된 회전축둘레에서 회전운동하는 강체의 각가속도는 외부힘의 모멘트에 비례하고 강체의 관성모멘트에 거꿀비례한다. 즉

$$\beta = \frac{M}{I}$$

이 관계식을 뉴톤의 운동방정식형식으로 쓰면 다음과 같다.

$$M = I\beta = I\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$ **강체의 회전운동방정식**

강체가 회전운동할 때 질량분포의 변화가 없으면 관성모멘트 I는 주어진 경우에 일정하다. 따라서 강체의 회전운동방정식에 관계식 $I\cdot\Delta\omega = \Delta L$ 을 고려하면 다음과 같이 쓸수 있다.

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

단위시간동안에 생긴 강체의 각운동량의 변화는 그에 작용한 힘모멘트와 같다. 이 관계식은 강체의 성분특성량들의 관계식에도 적용할수 있고 순간회전중심에 대한 운동에도 쓸수 있다.

회전축이 한 평면을 따라 이동하는 강체의 회전운동방정식

? 직선으로 굴러가는 바퀴는 어떤 운동을 하는가.(그림 6-31)

바퀴는 질량중심이 이동하는 병진운동과 질량중심 둘레에서의 회전운동을 동시에 한다. 이러한 바퀴의 운동방정식을 질량중심의 병진운동방정식과 질량중심 둘레의 회전운동방정식으로 표시할수 있다.

강체의 질량을 m, 질량중심에 대한 관성모멘트를 I_C, 외부힘을 $\vec{F}$, 질량중심에 대한 외부힘모멘트를 $\vec{M}$ 이라고 하면 다음과 같은 방정식을 쓸수 있다.

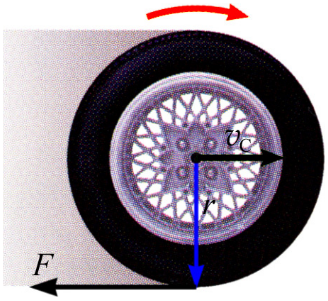


그림 6-31. 바퀴의 운동

$$m\frac{\Delta\vec{v}_C}{\Delta t} = \vec{F},\quad I_C\frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \vec{M}$$ **강체의 평면운동방정식**

이러한 관계식은 성분별로도 쓸수 있다.

⚠ 강체의 평면운동은 순간회전중심을 찾을수 있으면 그 둘레로의 회전운동방정식 하나로도 구할수 있다.

[례제] 수평면과 각 α 로 경사진 면을 따라 미끌지 않고 굴러내려가는 구의 가속도를 구하여라.(그림 6-32)

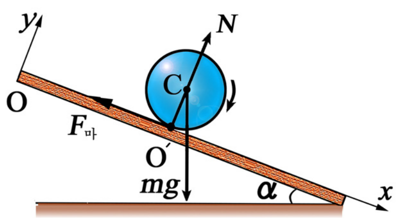


그림 6-32

풀이. 강체의 평면운동방정식에 의하면

$$m\frac{\Delta v_x}{\Delta t} = F_x \;\rightarrow\; ma_x = mg\sin\alpha - F_{마} \qquad (1)$$

$$m\frac{\Delta v_y}{\Delta t}=F_y \;\rightarrow\; ma_y=N-mg\cos\alpha=0 \qquad (2)$$

$$I_C\frac{\Delta\omega}{\Delta t}=M_C \;\rightarrow\; I_C\beta=rF_{마} \qquad (3)$$

구가 미끌지 않는다는 조건으로부터 $v_x=\omega r$이므로

$$a_x=\frac{\Delta v_x}{\Delta t}=r\frac{\Delta\omega}{\Delta t}=r\beta$$

이고 구의 중심에 대한 관성모멘트가 $I_C=\frac{2}{5}mr^2$이므로 식 3으로부터

$$F_{마}=\frac{I_C}{r}\beta=\frac{2mr}{5}\beta$$

이다. 따라서 식 1에 의하여 β를 구하면

$$mr\beta=mg\sin\alpha-\frac{2mr}{5}\beta$$

$$\beta=\frac{mg\sin\alpha}{mr+\frac{2mr}{5}}=\frac{5}{7r}g\sin\alpha$$

이다. 이로부터 가속도를 구하면 다음과 같다.

$$a_x=r\beta=\frac{5}{7}g\sin\alpha$$

한편 가속도 a_x를 순간회전중심둘레로의 회전운동방정식 하나로 단번에 얻을수도 있다.

슈타이너의 정리에 의하면 순간회전중심 O′에 대한 관성모멘트는

$$I=I_C+mr^2=\frac{2}{5}mr^2+mr^2=\frac{7}{5}mr^2$$

이고 순간회전중심에 대한 회전운동방정식은 구를 회전시키는 힘모멘트가 $M=rF=rmg\sin\alpha$이므로 $I\beta=M$이다. 따라서

$$\beta=\frac{M}{I}=\frac{5rmg\sin\alpha}{7mr^2}=\frac{5g}{7r}\sin\alpha$$

이로부터 가속도를 구하면 다음과 같다.

$$a_x=r\beta=\frac{5}{7}g\sin\alpha$$

문 제

1. 관성모멘트가 $I=10\text{kg}\cdot\text{m}^2$인 바퀴를 $M=5\text{N}\cdot\text{m}$인 힘모멘트로 돌렸다.
   ㄱ) 얼마만한 각가속도를 얻겠는가?
   ㄴ) 20s후에 바퀴의 각속도는 얼마인가?
2. 질량이 m인 원판의 테두리에 실을 감고 그끝을 천정에 고정시켰다. 원판에 감긴 실이 풀리면서 원판이 중력의 작용으로 아래로 내려올 때 원판의 가속도 a와 실의 장력 T는 얼마인가?(그림 6-33)

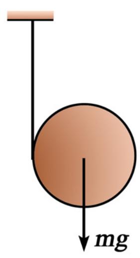


그림 6-33

3. 관성모멘트가 $I=63.6\text{kg}\cdot\text{m}^2$인 관성바퀴가 $\omega=31.4\text{rad/s}$의 각속도로 돌고있다. 이 바퀴에 제동힘모멘트가 걸려 $t=20\text{s}$후에 멈추어섰다. 제동힘모멘트를 구하여라.

제 5 절. 강체의 각운동량보존법칙

각운동량보존법칙

병진운동하는 물체들에 운동량보존의 법칙이 성립하는것처럼 회전운동하는 물체의 각운동량에도 어떤 법칙성이 있는가를 알아보자.

그림 6-34와 같이 무거운 물체를 두손에 들고 마찰없이 돌아가는 회전의자에 앉아 회전의자축주위로 돌아가는 운동을 살펴보자.

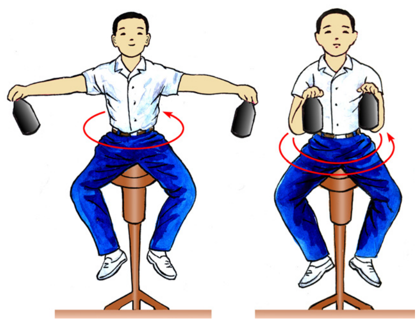


그림 6-34. 회전의자에서 팔을 편 경우와 모은 경우의 각속도

물체를 든 팔을 몸가까이에 가져갈 때와 팔을 펼 때 회전속도가 어떻게 달라지는가를 본다.

팔을 모으면 빨라지고 팔을 펴면 떠진다.

여러번 반복하여도 같은 현상이 나타난다.

이것은 팔을 모으면 관성모멘트가 작아지면서 각속도가 커지고 반대로 팔을 벌리면 관성모멘트가 커지면서 각속도가 작아진다는것을 보여준다. 이 현상의 원인을 밝혀보자.

강체의 회전운동방정식 $\frac{\Delta L}{\Delta t}=M$ 에서 회전의자가 돌아갈 때 마찰력과 공기저항을 무시하면 외부힘모멘트가 령이며 각운동량의 변화도 령이다.

이것은 힘모멘트의 작용이 없을 때 계의 각운동량이 보존된다는것을 보여준다.

외부힘모멘트의 작용이 없을 때 강체나 물체계의 각운동량이 일정하게 보존되는 것을 **각운동량보존법칙**이라고 부른다.

$$\vec{M}=0, \quad \vec{L}=\sum \vec{L}_i=\text{일정} \qquad \textbf{각운동량보존법칙}$$

팔을 편 때를 첫째 경우로, 모은 때를 둘째 경우로 보면 웃식을 다음과 같이 표시할수 있다.

$$L_1=L_2=\cdots=\text{일정} \quad \text{즉} \quad I_1\omega_1=I_2\omega_2=\cdots=\text{일정}$$



그림 6-35. 휘거선수의 빠른 회전운동

회전의자에서 팔을 편 상태의 관성모멘트를 I_1, 팔을 모은 상태의 관성모멘트를 I_2이라고 하면 $I_1>I_2$이므로 $\omega_1<\omega_2$이 된다.

이러한 원리는 휘거선수들이 팔을 가운데로 모으면서 얼음판우에서 빨리 돌 때에도 리용된다.(그림 6-35)

❓ 물체계의 각운동량이 일정하게 보존되는 현상이 계전체가 회전할 때에만 나타나는가 아니면 계 내부의 어떤 부분에서 각운동량의 변화가 있을 때에도 나타나는가.

그림 6-36과 같은 회전의자에 앉아 회전축이 있는 자전거바퀴를 수평으로 들고 돌리면 의자가 어떻게 회전하겠는가. 자전거바퀴를 처음과 반대방향으로도 돌려보자.

사람이 앉아있는 회전의자는 자전거바퀴의 회전방향과 늘 반대로 돌아간다.

이것은 바퀴의 각운동량을 지워버리는 각운동량이 회전의자에 작용한다는것을 보여준다.

※ 각운동량보존법칙에 의하여 강체가 회전할 때 외부힘모멘트의 어느 한 성분만이 령이면 각운동량의 그 방향성분만이 보존된다. 실례로 $M_z=0$ 이면 $L_z=\sum L_{iz}$ =일정이다.



그림 6-36. 바퀴를 돌리면 사람은 반대로 돌아 각운동량이 보존된다

각운동량은 벡토르량이므로 각운동량이 보존될 때 크기뿐만아니라 방향도 보존된다.

각운동량보존법칙은 병진운동에서 운동량보존법칙과 맞먹는 물리학의 기둥법칙의 하나이다.

쟈이로스코프

원반처럼 대칭축이 있고 대칭축에 대한 관성모멘트가 특별히 큰 물체를 생각하자.

이렇게 물체가 대칭축둘레로 빨리 돌면서 회전축의 방향을 공간에서 자유롭게 변화시킬수 있게 만든 팽이의 한 종류를 **쟈이로스코프**라고 부른다.(그림 6-37)

쟈이로스코프는 팽이의 회전축이 방향을 쉽게 바꿀수 있도록 3개의 축(두개의 원형고리)에 설치되여있다.

팽이의 축을 받쳐준 안쪽 고리는 수평축둘레로 돌수 있고 바깥쪽 고리는 수직축둘레로 돌수 있는데 그것의 기하학적중심은 고정된다.

쟈이로스코프는 회전축에 대한 관성모멘트가 크도록 만들었고 또 대칭축둘레로 빨리 돌고있기때문에 회전축방향의 각운동량성분이 특별히 크다.

팽이가 돌지 않으면 넘어지지만 빨리 돌리면 회전축을 유지하는것처럼 고속회전하는 쟈이로스코프는 설치한 틀을 임의로 놓아도 회전축의 방향을 보존한다.



그림 6-37. 쟈이로스코프

틀을 움직일 때 회전축과 수직인 각운동량의 성분이 작으므로 무시하면 쟈이로스코프의 각운동량은 $\vec{L}=I\vec{\omega}$ 이며 각운동량보존법칙에 따라 $\vec{\omega}$ 의 방향이 유지된다.(그림 6-38)

쟈이로스코프의 이 성질은 배, 비행기, 로케트, 어뢰 등의 운동방향을 보존하는데 리용된다.

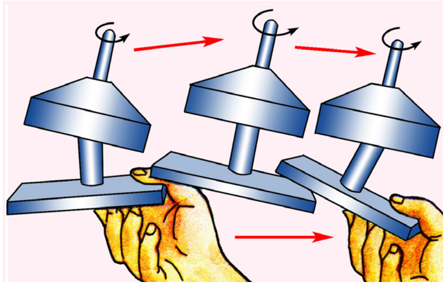


그림 6-38. 틀의 위치를 바꾸어도 쟈이로스코프의 회전축은 방향을 보존한다

쟈이로스코프의 회전축에 전동기를 결합시키고 회전축을 주어진 방향(수직, 수평 또는 별방향)에 맞추어놓으면 비행기나 로케트의 운동과는 관계없이 회전축의 방향을 보존한다.

[례제] 질량이 m이고 반경이 R인 수평원판의 모서리에 크지 않은 장난감《포》를 고정시켜놓았다. 원판은 수직축주위로 자유롭게 돌수 있다. 《포》가 발사될 때 《포탄》은 원판의 접선방향으로 수평속도 v를 가지고 날아간다. 《포탄》의 질량은 $m_{탄}$, 《포》의 질량은 $m_{포}$이다. 발사후 원판의 각속도를 구하여라.(그림 6-39)

풀이. 발사하기 전에 《포》와 원판에 작용하는 외부힘모멘트는 령이다.

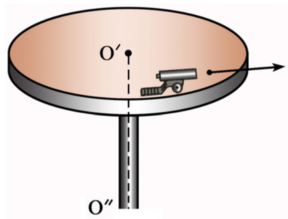


그림 6-39

발사할 때 《포》와 원판사이에는 내부힘만 작용하며 그것의 힘모멘트들의 합은 령과 같다. 때문에 《포탄》과 《포》, 원판의 각운동량들의 합은 변하지 않는다.

《포탄》의 각운동량은 《포탄》의 운동량 $m_{탄}v$ 에 힘의 팔을 곱한 값 $m_{탄}vR$ 와 같다.

원판과 《포》의 각운동량은 두 부분으로 이루어져있는데 《포》의 각운동량 $m_{포}R^2\omega$ 와 원판의 각운동량 $\frac{1}{2}mR^2\omega$ 의 합과 같다.

각운동량보존법칙에 의하여 다음과 같은 식을 쓸수 있다.

$$m_{탄}vR = m_{포}R^2\omega + \frac{1}{2}mR^2\omega$$

여기로부터 회전각속도를 구한다.

$$\omega=\frac{m_{탄}v}{(m_{포}+\frac{1}{2}m)R}$$

문 제

1. 왜 도약판에서 물속으로 뛰여들기하는 선수가 팔과 다리를 몸가까이에 모으는가?
2. 질량이 100kg인 고르로운 수평원판이 그의 중심을 지나는 드림선을 축으로 $\nu_1=10\text{min}^{-1}$의 회전수로 돌고있다. 질량이 m=60kg인 사람이 이 원판의 모서리에 서 있다가 원판의 중심으로 걸어가면 원판이 얼마만한 회전수 ν_2로 돌아가겠는가?
3. 질량이 M=80kg이고 반경이 R=1m인 고르로운 수평원판이 드림선을 축으로 $\nu_1=21\text{min}^{-1}$의 회전수로 돌고있다. 이 원판의 가운데에 사람이 두손에 아령을 쥐고 팔을 벌리고 서있다가 거두었다. 수직축에 대한 사람의 관성모멘트는 팔을 편 경우와 모은 경우에 각각 I_1=2.94kg·m^{2}와 I_2=0.94kg·m^{2}이다. 원판이 얼마만한 회전수 ν_2로 돌아가겠는가?

제 6 절. 강체의 운동에네르기

힘모멘트가 하는 일

전동기나 타빈은 힘모멘트를 받아 돌아간다.

? 축이 이동하지 않고 돌아가는 경우에 수행되는 일을 어떻게 계산하는가.

반경이 r인 치차의 한 이발에 힘 F를 주어 거리 ΔS 만큼 돌렸을 때 이발의 회전각은 $\Delta\varphi$ 이다.(그림 6-40)

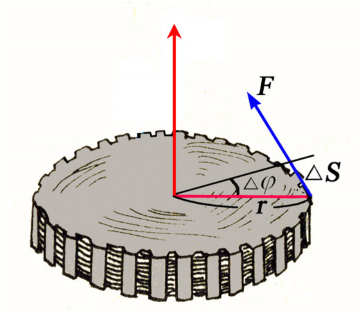


그림 6-40. 힘모멘트가 하는 일

치차이발이 받은 일은 다음과 같이 표시된다.

$$A = F\cdot\Delta S = F\,r\cdot\Delta\varphi = M\cdot\Delta\varphi$$

이발이 받은 일은 강체전체에 대한 일로 된다.

강체를 돌릴 때 수행되는 일은 힘모멘트에 돌아간 각을 곱한것과 같다.

병진운동에서처럼 회전운동에서도 일의 부호를 따진다. 힘모멘트가 수행한 일은 강체가 힘의 방향으로 돌면 +이고 제동힘모멘트가 작용할 때와 같이 도는 방향과 반대이면 −이다.

강체의 운동에네르기

병진운동하는 물체가 력학적운동에네르기를 가지는것처럼 회전운동하는 강체도 에네르기를 가질수 있다. 먼저 고정축둘레로 도는 강체의 운동에네르기를 계산하여 보자.

강체는 질점들의 모임이므로 이 질점들의 운동에네르기를 전부 합하면 강체의 운동에네르기를 구할수 있다.

고정축둘레로 도는 강체안의 모든 점은 같은 각속도로 운동한다는것을 리용하자.(그림 6-41)

강체를 이루는 질점 m_i 의 속도는 $v_i = \omega r_i$ 이다.

여기서 r_i 는 회전축에서 이 질점까지의 수직거리이다.

질점의 운동에네르기를 다음과 같이 표시한다.

$$K_i = \frac{m_i v_i^2}{2} = \frac{m_i \omega^2 r_i^2}{2}$$

모든 질점의 운동에네르기를 합하여 강체의 운동에네르기를 구하자.

$$K = \sum K_i = \sum \frac{m_i \omega^2 r_i^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \sum m_i r_i^2$$

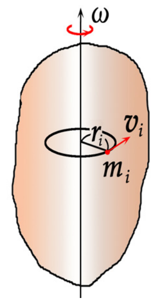


그림 6-41. 강체의 운동에네르기

여기서 $\sum m_i r_i^2 = I$ 로서 강체의 관성모멘트임을 고려하면 $K = \frac{I\omega^2}{2}$ 이다. 즉 강체의 회전운동에네르기는 강체의 관성모멘트와 각속도의 두제곱을 곱한 값의 절반과 같다.

수평면우로 굴러가는 구에서와 같이 강체의 회전축이 이동하는 경우에는 운동에네르기가 어떻게 표시되는가.

강체의 일반적인 운동은 병진운동과 회전운동의 합성운동이다. 따라서 강체의 운동에네르기는 병진운동에네르기와 회전운동에네르기의 합으로 구할수 있다.

$$K = \frac{mv_C^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$$ 강체의 운동에네르기

일반적으로 강체의 에네르기는 강체의 운동에네르기와 자리에네르기의 합으로 이루어진다.

문 제

1. 회전운동방정식을 써서 강체를 돌릴 때 한 일이 운동에네르기의 증가로 넘어간다는것을 증명하여라.
2. 반경이 R 인 반구면안에서 질량이 m 이고 반경이 r 인 강철구가 평형자리를 중심으로 미끌지 않고 굴면서 왔다갔다하는 운동을 한다. 평형자리를 지날 때 구의 운동에네르기를 구하여라. 강철구의 처음자리를 구면의 중심을 지나는 드림선과 이루는 각으로 표시하면 α_0 이다.
3. 강체에 대한 일의 공식과 운동에네르기공식을 질점의 경우와 대비하여보아라.

생각하기 병진운동과 회전운동을 대비하면서 빈칸에 해당한 량 또는 식을 써넣어보아라.

병진운동	회전운동
Δr	
	$\omega = \dfrac{\Delta\varphi}{\Delta t}$
$a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t}$	
$a = 0, \quad S = vt$	$\beta = 0, \quad \varphi = \omega t$
	$\omega = \omega_0 + \beta t$
$S = v_0 t + \dfrac{1}{2} a t^2$	
	$\omega^2 - \omega_0^2 = 2\beta\varphi$
m	$I = \sum m_i r_i^2$
$F = ma$	
$\Delta(mv) = F \cdot \Delta t$	$\Delta(I\omega) = M \cdot \Delta t$
$m_1 v_1 = m_2 v_2 = \cdots =$ 일정	$I_1\omega_1 = I_2\omega_2 = \cdots =$ 일정
	$\dfrac{1}{2} I\omega^2$

탐구

문제: 자체로 쟈이로스코프를 리용하여 땅크포신을 설계하여보아라.

방향: · 실험실에 있는 쟈이로스코프의 동작과 원리를 구체적으로 조사하여라.
땅크가 울퉁불퉁한 길을 달려도 포신이 조준한 방향을 유지하도록 쟈이로스코프를 포신에 설치하기 위한 방도를 찾아보아라.

· 쟈이로스코프와 땅크동체, 쟈이로스코프와 포신을 어떻게 설치해야 하겠는가를 생각하고 설계하여보아라.

복습문제

1. 판에 있는 세개의 구멍을 거쳐 한끝을 공통매듭에 련결한 세개의 줄을 통과시키고 줄의 다른 끝들에는 동일한 물체들을 매달아놓았다. 만일 계가 평형상태에 있다면 매듭으로부터 뻗어나간 줄들사이의 각을 구하여라.(그림 6-42) (답. 120°)

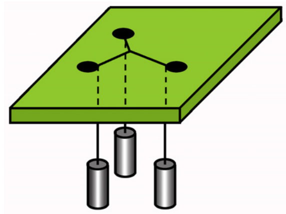


그림 6-42

2. 길이가 같은 세개의 용수철우에 질량이 m인 막대기를 놓았다. 튐성이 같은 두 용수철은 막대기의 끝점들을 받치고있으며 막대기의 중간에서 받치고있는 용수철은 튐성이 2배나 더 크다. 용수철로부터 막대기에 작용하는 힘들을 구하여라.

(답. $F_1 = F_3 = \frac{mg}{4}$, $F_2 = \frac{mg}{2}$)

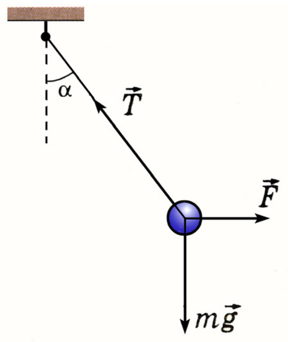


그림 6-43

3. 줄에 매여있는 질량이 m인 구가 힘 $\vec{F}$에 의하여 기울어진 자리에 멎어있다. 평형상태에서 줄이 드림선과 이루는 각 α의 탕겐스와 장력 T를 구하여라.(그림 6-43)

(답. $\tan\alpha = \frac{F}{mg}$, $T = \sqrt{F^2 + (mg)^2}$)

4. 길이가 ℓ인 균일한 막대기 AB가 서로 수직인 미끄러운 두 벽에 기대여 수평벽과 각 φ를 이루고있다. 막대기가 미끌기 시작할 때의 각은 얼마인가? 수평벽과 막대기사이, 수직벽과 막대기사이의 마찰결수는 각각 μ_1, μ_2이다.

(답. $\varphi < \arctan\frac{1-\mu_1\mu_2}{2\mu_1}$)

5. 질량이 m인 균일한 막대기가 매끈한 벽과 매끈한 마루에 의지하여 세워져있다. 막대기가 넘어지지 않도록 수평으로 놓인 실로 유지하여준다. 실의 한끝은 막대기의 아래끝에 매여있고 다른 끝은 벽과 마루사이의 구석에 고정되여있다. 막대기가 바닥과 각 α를 이룰 때 벽의 작용힘과 바닥의 작용힘, 실의 장력을 구하여라.(그림 6-44)

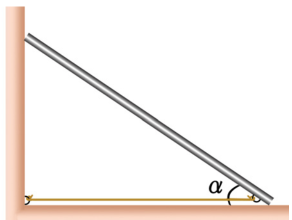


그림 6-44

(답. $\frac{1}{2}mg\cot\alpha$, mg, $\frac{1}{2}mg\cot\alpha$)

6. 무겁고 균일한 봉의 가운데를 90°의 각으로 구부리고 한끝을 줄에 련결하여 매달았다. 줄에 련결된 봉의 부분이 드림선과 이루는 각을 구하여라.

(답. $\tan\alpha = \frac{1}{3}$)

7. 그림 6-45와 같은 상태에서 평형을 이루려면 바닥에 대한 균일한 막대기의 마찰결수는 얼마여야 하겠는가? 막대기와 실의 길이는 같다. 실과 막대기가 이루는 각은 직각이며 점 A와 C는 한 수직선우에 놓여있다.

(답. $\mu \geq \frac{1}{3}$)

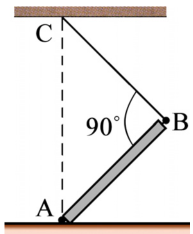


그림 6-45

8. 지레대의 매 부분 AB, BC, CD들은 길이가 같고 서로 직각을 이룬다. 지레대의 회전축이 점 B를 지난다. 지레대 AB의 A점에 수직으로 힘 F가 작용한다. 지레대가 평형상태에 있기 위하여 점 D에 주어야 할 힘의 최소값을 구하여라. 지레대의 무게는 무시한다.(그림 6-46)

(답. $\frac{F}{\sqrt{2}}$)

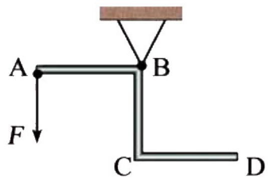


그림 6-46

9. 수평으로 놓여있는 길이가 2ℓ이고 질량이 m인 균일한 막대기의 한끝을 구형으로 만들고 받치개의 점 A에 고정하였다. 막대기의 다른 끝점을 수평면과 각 α로 경사진 매끈한 경사면에 있는 점 B에 의지하여 놓았다. 막대기에서 점 A로부터 a만 한 거리에 질량 m_1인 물체를 놓았을 때 경사면의 맞선힘 N을 구하여라.(그림 6-47)

(답. $\frac{g(m\ell+m_1a)}{2\ell\cos\alpha}$)

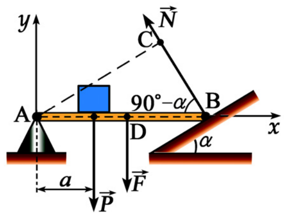


그림 6-47

10. 반경이 r이고 질량이 m인 작은 구를 움직이지 않는 반경이 R인 큰 구에 가벼운 실로 매여놓았다. 실은 구의 정점에 련결되여있다. 실은 수평으로 놓여있고 마찰은 없다고 본다. 실의 장력 T와 큰 구가 작은 구에 주는 힘 N을 구하여라.(그림 6-48)

(답 $T=mg\frac{\sqrt{(R+r)^2-R^2}}{R}$, $N=mg\left(1+\frac{r}{R}\right)$)

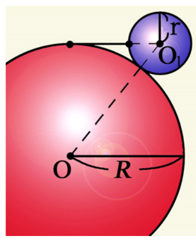


그림 6-48

11. 반경이 R인 도르래에 걸쳐 늘여져있는 줄에 질량이 각각 m_1, m_2 ($m_1<m_2$)인 두 물체가 매달려있다. 도르래의 질량이 m이라면 물체의 가속도 a와 도르래의 량쪽에 있는 줄의 장력의 차를 구하여라. 줄은 늘어나지 않으며 도르래에서 미끌어지지 않는다. 도르래의 관성모멘트는 $mr^2/2$이다.(그림 6-49)

(답. $a=\frac{m_2-m_1}{m_1+m_2+m/2}g$, $T_2-T_1=\frac{1}{2}ma$)

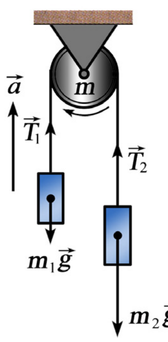


그림 6-49

12. 반경이 R이고 질량이 m인 원기둥이 각 α로 경사진 면으로 굴러내린다. 원기둥 중심의 가속도와 마찰력을 구하여라.

(답. $a=\dfrac{2}{3}g\sin\alpha$, $F=\dfrac{1}{3}mg\sin\alpha$)

13. 질량이 m이고 반경이 R인 수평원판이 각속도 ω로 회전한다. 원판의 중심에 질량이 m_1인 사람이 서있다. 사람이 중심으로부터 모서리로 반경방향으로 이동한다면 원판의 각속도는 어떻게 되겠는가? 사람을 질점으로 생각하여라.

(답. $\dfrac{m}{2m_1+m}\omega$)

14. 반경이 r인 작은 구가 반경이 R인 구면우의 가장 높은 점에서 미끌지 않고 굴러내린다. 구가 구면우의 어느 자리에서 떨어지겠는가?(그림 6-50)

(답. $h=\dfrac{7}{17}(R+r)$)

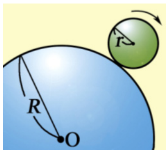


그림 6-50

15. 무겁고 고르로운 원기둥이 수평대우에서 미끌지 않고 매우 느린 속도로 굴러간다. 수평대 AB의 경계 B는 모가 나고 원기둥의 모선과 평행이다. 원기둥의 반경은 r이다. 원기둥이 수평대에서 떨어지는 순간 원기둥의 축과 모서리 B를 포함하는 평면은 드림선과 각 α를 이루었다. 원기둥이 떨어지는 순간의 원기둥의 각속도와 각 α의 코시누스를 구하여라. 마찰력은 무시한다.(그림 6-51)

(답. $\omega=\sqrt{\dfrac{4g}{7r}}$, $\cos\alpha=\dfrac{4}{7}$)

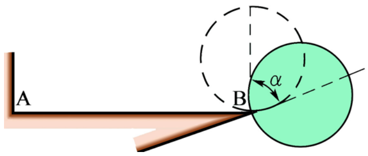


그림 6-51

16. 반경이 r인 구가 수평대우에서 미끌지 않고 굴러가다가 각 α로 경사진 경사면으로 넘어간다. 얼마만한 속도로 운동하면 모가 난 자리에서 면으로부터 리탈되지 않고 경사면을 따라 굴러가겠는가?(그림 6-52)

(답. $v\leqslant\sqrt{gr\left(\dfrac{17}{7}\cos\alpha-\dfrac{10}{7}\right)}$)

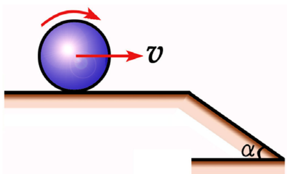


그림 6-52

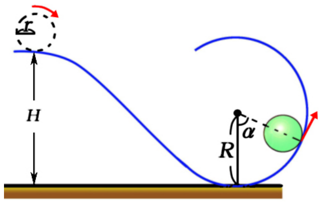


그림 6-53

17. 반경이 r인 구가 경사면을 따라 미끌지 않고 굴러내려가다가 반경이 R인 원자리길을 따라 올라간다. 얼마만한 높이에서 굴리면 원자리길에서 떨어지지 않고 굴겠는가? 떨어지는 경우에는 어디에서 떨어지겠는가?(그림 6-53)

(답. $H\geqslant 2.7(R-r)$, $\cos\alpha=-\dfrac{10}{17}\left(\dfrac{H}{R-r}-1\right)$)

제 7 장. 력학적진동

진동은 물리적현상전반에 대한 연구에서 기초로 되며 실천적으로도 의의가 크다. 진동에 대한 정확한 표상이 형성되여야 소리현상, 전자기적현상, 광학적현상 등 물리학의 여러 대상들을 옳게 리해할수 있으며 기계공학, 무선공학, 건축공학을 비롯하여 실천에서 제기되는 과학기술적문제들을 원만히 풀수 있다.

이 장에서는 력학적진동을 기본으로 하여 가장 단순한 조화진동과 고유한 진동특성에 의해 구분되는 고유진동, 감쇠진동, 강제진동과 진동의 중첩에 대하여 학습한다.



제 1절. 진동과 그것을 특징짓는 량

우리 둘레에서는 벽시계의 추나 그네의 운동, 가야금줄의 운동처럼 같은 운동을 반복하는 물리적현상들을 많이 보게 된다.

같은 운동이 반복되는 현상들을 고찰하기 위하여 어떤 물리적량들이 필요하겠는가.

진동과 그 원인

진동이 어떻게 일어나는가.

실 험

○ 평형자리에 멎어있는 흔들이의 추를 옆으로 약간 밀었다가 놓아본다.(그림 7-1의 ㄱ) 추는 평형자리를 중심으로 왔다갔다한다.

○ 용수철의 한끝에 매달려 평형자리에 멎어있는 추를 아래로 약간 당겼다가 놓아본다.(그림 7-1의 ㄴ) 이 경우에도 추는 평형자리를 중심으로 오르내린다.

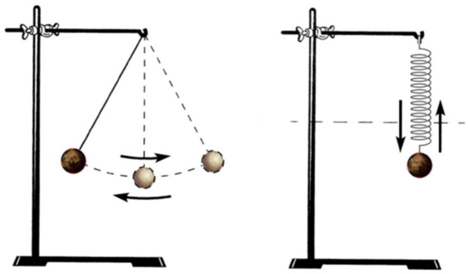


그림 7-1. 흔들이와 용수철에 매달린 물체의 진동

이처럼 물체가 평형자리를 중심으로 왔다갔다하는 운동을 **력학적진동** 간단히 **진동**이라고 부른다.

그러면 진동은 어떻게 일어나는가.

흔들이의 추는 평형자리에서 벗어나면 평형자리로 향하는 중력의 성분힘 F를 받는다.(그림 7-2)

마찬가지로 용수철에 매달려 진동하는 추도 평형자리에서 벗어나면 평형자리로 향하는 튐힘을 받는다.(그림 7-3)

이와 같이 물체를 평형자리로 되돌아가게 하는 힘을 **되돌이힘**이라고 부른다.

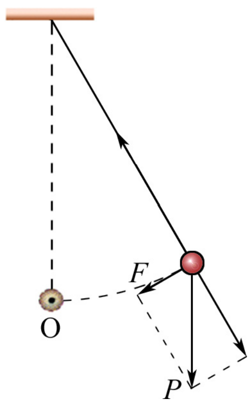


그림 7-2. 흔들이에서 진동이 일어나는 원인

평형자리에서 벗어난 추는 되돌이힘때문에 평형자리에서 멀리 벗어나지 못하고 얼마쯤 갔다가 되돌아온다.

추가 평형자리에 오면 되돌이힘은 령으로 된다. 그러나 추는 관성때문에 평형자리에 멎지 않고 계속 운동하여 평형자리를 벗어났다가 되돌이힘에 의해 다시 되돌아온다.

이처럼 진동은 평형자리에서 벗어난 물체에 평형자리에로 되돌려보내는 되돌이힘이 작용하고 평형자리에서 멎지 않고 계속 운동하려는 물체의 관성이 있기때문에 일어난다.

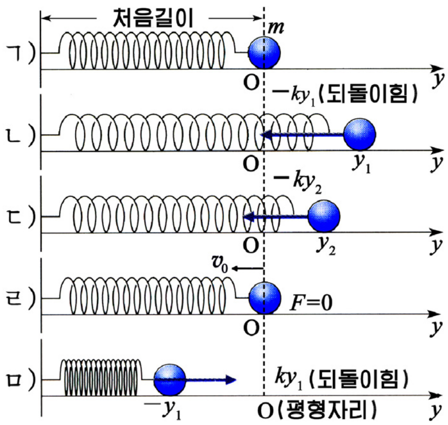


그림 7-3. 용수철에서 진동이 일어나는 원인

진동을 특징짓는 량

진동은 일정한 시간을 두고 운동이 되풀이되는 특징을 가지므로 진폭, 진동주기, 진동수와 같은 물리적 량들로 특징짓는다.

진폭. 진동하는 물체는 언제나 일정한 범위안에서 운동한다. 진동하는 물체가 평형자리에서 제일 멀어졌을 때의 변위를 **진폭**이라고 부른다. 임의의 시각에 물체의 변위(평형자리로부터 물체까지의 거리)는 언제나 진폭보다 클수 없다.(그림 7-4)

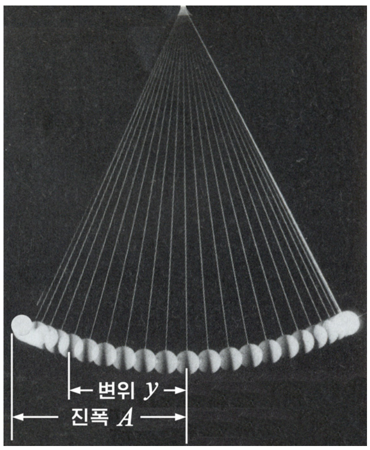


그림 7-4. 진폭과 변위

진동주기. 물체가 한번 완전히 진동하는데 걸리는 시간을 **진동주기** 간단히 **주기**라고 부른다.

진동주기의 단위는 1s이다. 주기가 1s라는것은 한번 진동하는데 1s의 시간이 걸린다는것을 의미한다.

진동수. 물체가 1s사이에 진동하는 회수를 **진동수** 혹은 **주파수**라고 부른다. 진동수의 단위는 1Hz이다. 1Hz는 1s동안에 한번 진동할 때의 진동수와 같다. 즉

$$1\text{Hz}=1\text{s}^{-1}$$

진동주기와 진동수는 물체가 얼마나 빨리 진동하는가를 나타내는 량이다.

진동수와 진동주기사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\nu=\frac{1}{T}$$ 진동수와 진동주기사이의 관계

진동하는 물체의 특성량들을 직관적으로 보여줄수 없겠는가.

실험

○ 색감을 묻힌 붓이나 잉크를 넣은 펜을 설치한 추를 아래우로 또는 좌우로 흔들고 그옆이나 밑에서 종이테프를 등속으로 이동시킨다.(그림 7-5)

○ 곡선이 새겨진 종이테프의 길이방향으로 가로축을 그리고 시간을 표시하며 그 세로축에 변위를 표시한다.

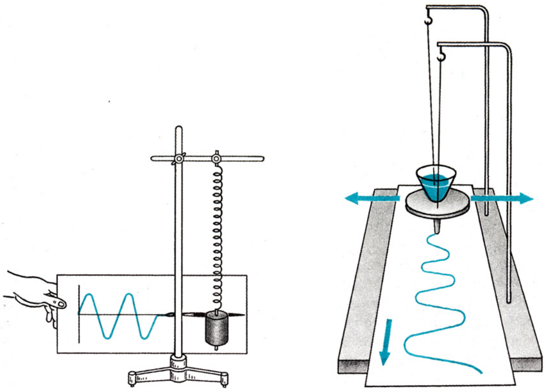


그림 7-5. 용수철과 흔들이에 매달린 추의 진동그라프

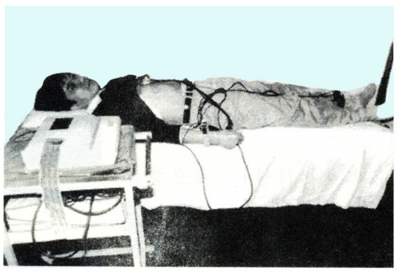
종이테프에 새겨진 곡선은 무엇을 보여주는가.

곡선은 진동하는 물체의 변위가 시간에 따라 어떻게 변하는가를 보여준다.

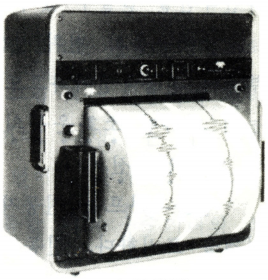
진동하는 물체의 변위나 그밖의 물리적량들의 시간에 따르는 변화를 보여주는 곡선을 **진동그라프**라고 부른다.

흔히 진동그라프는 시간에 따르는 변위값을 얻어 점을 표시하는 방법이나 진동하는 물체에 기록장치를 설치하는 방법으로 그린다.

진동하는 물체에 기록장치를 설치하고 진동을 기록하는 방법은 실천에서 널리 리용된다. 병원에서 리용하는 심전계, 지진을 관측하는 지진계 등은 이런 방법으로 진동을 기록한다.(그림 7-6)



심전계



지진계

그림 7-6. 심전계와 지진계

자유진동과 고유진동

한번 준 외부힘에 의하여 일어나는 진동을 **자유진동**이라고 부른다.

자유진동은 오래 계속되지 못하고 멎는다.

만일 공기의 저항이나 마찰력과 같은 운동을 방해하는 저항힘이 없고 오직 되돌이힘만을 받는 물체는 자유진동을 계속할것이다.

이처럼 되돌이힘만 받는 자유진동을 **고유진동**이라고 부른다.

리상적인 고유진동은 없으며 공기저항이나 마찰력과 같이 운동을 방해하는 힘이 매우 작아 무시된다면 자유진동을 고유진동으로 볼수 있다.

생각하기 그림 7-7의 흔들이에서 추에 작용하는 중력, 되돌이힘, 줄의 장력의 변화과정에 대하여 생각해보아라.

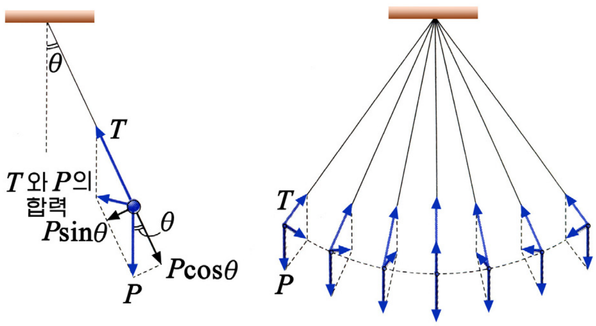


그림 7-7. 흔들이에서 추에 작용하는 중력, 되돌이힘, 장력의 변화

문 제

1. 다음의 문장에서 틀린 문장을 찾고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 모든 물체는 평형자리에서 벗어나면 진동한다.
   ㄴ) 고유진동은 언제나 진폭, 진동수, 진동주기가 일정하다.
   ㄷ) 흔들이의 되돌이힘은 변위에 관계없이 일정하다.
   ㄹ) 고유진동에서 되돌이힘은 시간에 관계없이 일정하다.
2. 우리 둘레에서 진동현상을 5가지이상 찾고 되돌이힘을 밝혀라.
3. 다음의 경우에 진동그라프를 그려라.
   ㄱ) 일정한 높이에서 바닥에 떨어뜨린 탁구공이 드림면우에서 진동하는 경우
   ㄴ) 마찰력이 없는 수평면우에 수직으로 마주세운 두개의 드림면사이에서 구가 수평방향으로 진동하는 경우

제 2 절. 조화진동과 그 표시

진동중에서 가장 단순한 진동은 조화진동이며 임의의 복잡한 진동은 다른 몇개의 조화진동들로 나누어 고찰할수 있다.

그러면 조화진동은 어떤 진동이며 어떻게 표시할수 있는가.

조화진동

되돌이힘만을 받는 용수철흔들이의 고유진동을 등속원운동하는 물체의 그림자의 운동과 비교하여보자.

실 험

○ 그림 7-8과 같은 장치에서 용수철에 매단 추를 A= OM 만큼 우로 올렸다가 놓아준다.

○ 전동기로 구 M의 회전수와 용수철흔들이의 진동수가 같아지도록 조절한다.

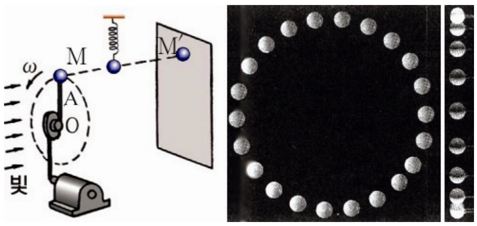


그림 7-8. 등속원운동하는 물체의 그림자의 운동과 추의 진동

구의 그림자의 운동과 추의 운동을 비교하면 무엇을 알수 있는가.

실험으로부터 추의 진동은 등속원운동하는 구의 그림자의 운동으로 바꾸어 고찰할수 있다는것을 알수 있다.

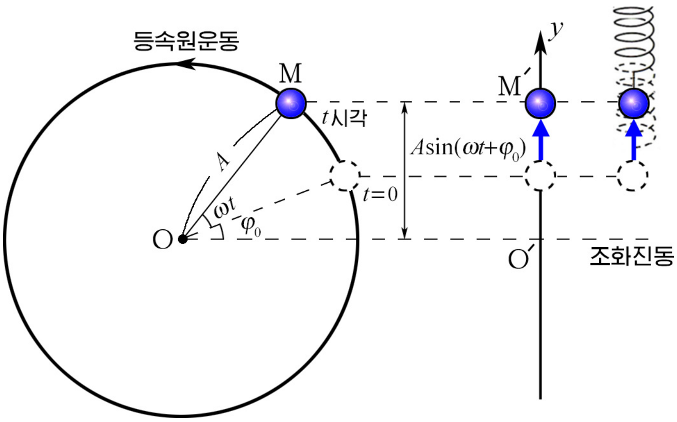


그림 7-9. 등속원운동에서 반경의 y축성분과 조화진동

그림 7-9 에서 구 M이 일정한 각속도 ω로 돌기때문에 t 시각에 회전각은 $\varphi=\omega t+\varphi_0$ 이며 구 M과 회전중심을 잇는 반경 A의 시누스값은 그림자 M′가 중심 O′로부터 벗어난 거리 y(변위)와 같다. 그러므로 용수철에 매달린 추가 진동하는 모양은 다음과 같이 표시된다.

$$y = A\sin(\omega t+\varphi_0) \quad \text{조화진동식} \tag{1}$$

식 1에서 $\varphi_0=0$이면 t시각에 회전각은 $\varphi=\omega t$로 되며 M′의 변위(또는 추의 진동모양)는 다음과 같다.

$$y = A\sin\omega t$$

이처럼 시간에 따르는 변위가 시누스(또는 코시누스)함수로 표시되는 진동을 **조화진동**이라고 부른다.

식 1을 그라프로 표시하면 그림 7-10과 같은 진동그라프가 얻어진다.

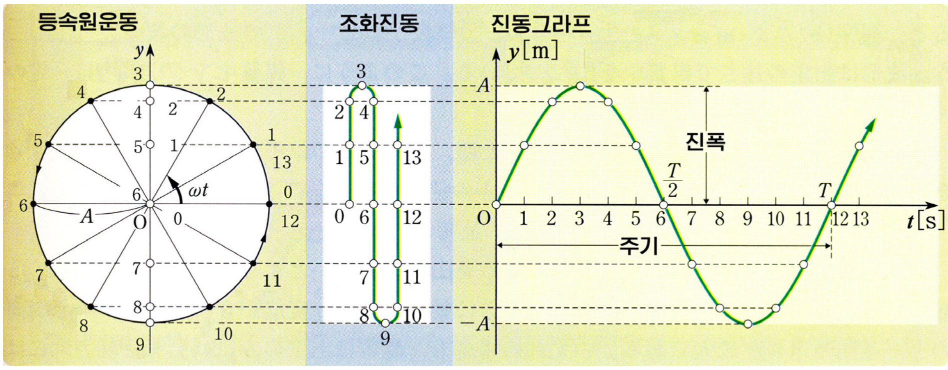


그림 7-10. 조화진동의 진동그라프

조화진동은 진폭, 진동수가 일정하므로 시간이 지나도 진동모양이 변하지 않는다. 그라프를 보면 고유진동은 곧 조화진동으로 된다는것을 알수 있다.

자리각과 자리각차

자리각. 조화진동식에서 시누스함수안의 값 $\varphi=\omega t+\varphi_0$을 진동의 **자리각**이라고 부른다. 여기서 $t=0$일 때의 자리각 φ_0을 **처음자리각**이라고 부른다.

진폭이 주어졌을 때 자리각 φ를 알면 그 시각에 진동하는 물체의 변위와 운동방향을 알수 있다.

그림 7-11과 같은 용수철흔들이에서 자리각이 $\varphi=0$이면 물체는 평형자리($y=0$)에서 웃방향으로 운동하며 자리각이 $\varphi=\pi$이면 평형자리($y=0$)에서 아래로 운동한다.

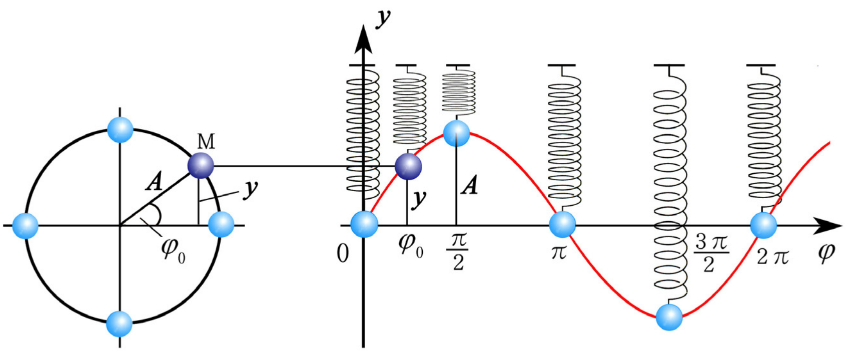


그림 7-11. 자리각과 변위 및 운동방향사이의 관계

또한 자리각이 $\varphi=\dfrac{\pi}{2}$ 이면 최대로 눌린 상태($y=A$)에서 물체가 멎어있고 $\varphi=\dfrac{3}{2}\pi$ 이면 최대로 늘어난 상태($y=-A$)에서 멎어있다.

조화진동식에서 ω는 단위시간동안에 생긴 자리각의 변화를 나타내는 량으로서 **각진동수**라고 부른다.

각진동수는 등속원운동에서의 각속도와 같이 표시된다. 즉

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi\nu \qquad \text{각진동수와 주기, 진동수사이의 관계} \tag{2}$$

자리각차. 두개이상의 진동을 동시에 고찰할 때에는 그것들의 자리각이 어떻게 차이나는가를 따져보게 된다. 두 진동의 자리각들의 차 $\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2$ 을 두 진동의 **자리각차**라고 부른다.

두 진동의 자리각차가 $\Delta\varphi=2k\pi$ ($k=0$, 1, 2,…)로 일정하면 두 물체는 진동한 수가 k만큼 차이나며 늘 같은 방향으로 진동한다. 이때 두 물체는 같은자리각으로 진동한다고 말한다.(그림 7-12)

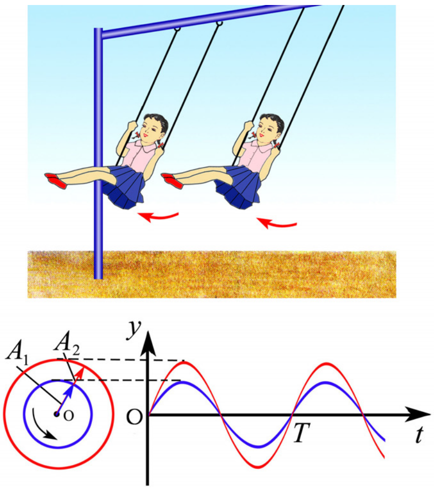


그림 7-12. 같은자리각으로 진동하는 두 물체의 진동그라프

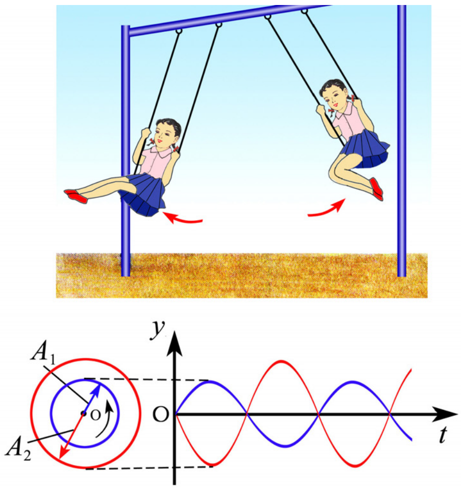


그림 7-13. 반대자리각으로 진동하는 두 물체의 진동그라프

두 진동의 자리각차가 $\Delta\varphi=(2k+1)\pi$($k=0$, 1, 2,…)로 일정하면 두 물체는 진동한 수가 $k+\dfrac{1}{2}$ 만큼 차이나며 늘 반대방향으로 진동한다. 이때 두 물체는 반대자리각으로 진동한다고 말한다.(그림 7-13)

같은 진동수를 가진 두 조화진동의 자리각차는 언제나 일정하며 처음자리각차와 같다. 즉

$$\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2=(\omega t+\varphi_{01})-(\omega t+\varphi_{02})=\varphi_{01}-\varphi_{02}=\text{일정}$$

그러나 진동수가 다른 두 조화진동의 자리각차는 시간에 따라 변한다. 즉

$$\Delta\varphi = \Delta\omega t + \Delta\varphi_0$$

여기서 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, $\Delta\varphi_0 = \varphi_{01} - \varphi_{02}$이다.

자리각이 큰것을 자리각이 앞섰다고 말하며 이것은 진동이 먼저 일어났다는것을 의미한다. 이처럼 조화진동을 구체적으로 표시하자면 진폭과 주기, 진동수뿐아니라 자리각과 자리각차도 알아야 한다.

조화진동의 벡토르표시

크기가 A인 벡토르 $\vec{A}$가 자리표원점 O에 시작점을 두고 ω의 각속도로 돌아간다고 하자.(그림 7-14)

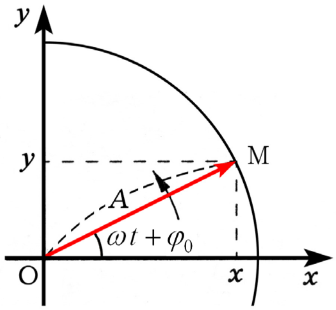


그림 7-14. 진폭벡토르

벡토르 $\vec{A}$의 끝점 M이 y축에 던지는 그림자는 $y=A\sin(\omega t+\varphi_0)$으로 표시되는 조화진동을 한다. 이때 벡토르 $\vec{A}$의 크기는 조화진동의 진폭과 같고 회전각속도 ω는 조화진동의 각진동수와 같다.

따라서 벡토르 $\vec{A}$의 회전운동은 조화진동의 특성을 잘 나타낼수 있다. 이런 벡토르를 **진폭벡토르**라고 부른다. 진폭벡토르를 리용하면 진동의 합성과 분해를 비롯하여 진동과 관련된 여러가지 문제들을 직관적으로 푸는데 편리하다.

생각하기 조화진동하는 용수철흔들이에서 되돌이힘을 등속원운동의 향심력과 비교하여 구해보아라.(그림 7-15)

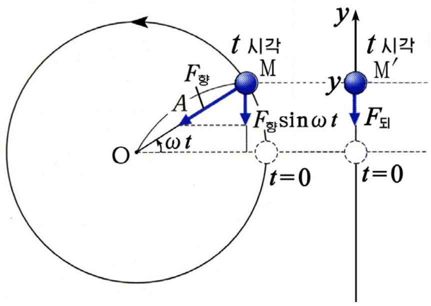


그림 7-15. 조화진동의 되돌이힘

자료 비조화진동

조화진동은 시간이 지나도 진동모양이 변하지 않는다.

이와는 달리 진동과정에 진폭, 진동수, 자리각 등이 변하면 그 진동은 비조화진동으로 된다.(그림 7-16)

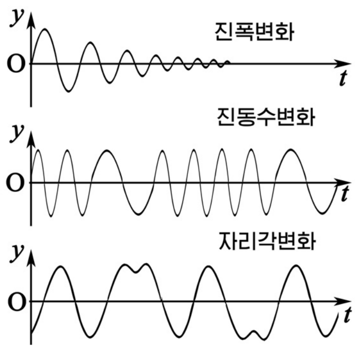


그림 7-16. 비조화진동

문 제

1. 다음의 문장에서 틀린 문장을 찾아보아라.
   ㄱ) 고유진동은 조화진동이다.
   ㄴ) 조화진동은 t에 따라 주기적으로 변하는 진폭을 가진다.
   ㄷ) 조화진동은 진폭, 주기, 자리각이 항상 일정한 진동이다.
   ㄹ) 조화진동에서 되돌이힘의 방향은 언제나 변위의 방향과 일치한다.
2. 각진동수가 같은 두 조화진동이 있다. 첫 진동의 변위가 령과 같은 순간부터 둘째 진동의 그라프를 그려라. 첫 진동은 자리각이 $\frac{\pi}{2}$(혹은 π, 2π, $\frac{3}{2}\pi$) 만큼 앞섰다.
3. 진동식 $y=0.03\sin(1.5\pi t+\frac{\pi}{2})$[m]로 표시되는 조화진동의 진폭, 진동수, 주기, $t=4$s 인 때의 자리각과 물체가 움직인 거리를 구하여라.
4. 용수철흔들이가 조화진동을 15번 진행하는데 3s의 시간이 걸린다. 이 시간동안에 흔들이추가 지나가는 거리는 120cm이다. 이 용수철흔들이의 진폭, 주기 및 진동수를 구하여라.

제 3 절. 진동에네르기

용수철흔들이나 흔들이추의 진동스트로보사진을 보면 조화진동하는 물체의 속도도 주기적으로 변한다는것을 알수 있다.(그림 7-17)

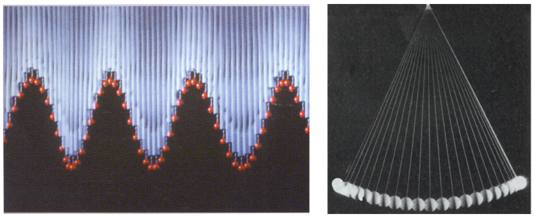


그림 7-17. 진동의 스트로보사진

조화진동의 속도와 가속도, 각진동수

조화진동의 속도와 가속도도 등속원운동하는 구 M의 그림자의 운동과 비교하면 쉽게 구할수 있다.

조화진동의 속도. 반경이 A인 원을 따라 ω의 각속도로 돌아가는 구 M의 그림자 M′는 조화진동한다.(그림 7-18)

즉 그림자의 변위는 $y=A\sin\omega t$로 표시된다.

구 M의 등속원운동에서 선속도의 크기는 $v_{선}=\omega A$이고 방향은 원의 접선방향이다.

그림에서 보는것처럼 조화진동의 속도는 단위시간동안에 생긴 변위로서 등속원운동의 선속도 ωA의 y축성분 $\omega A\cos\omega t$와 같다.

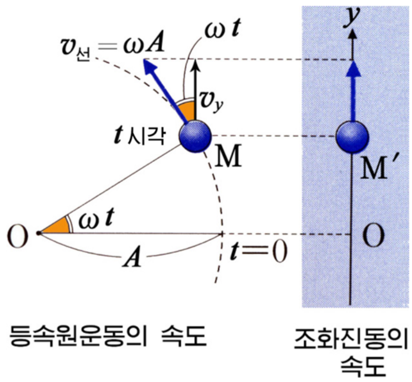


그림 7-18. 조화진동의 속도

즉 Δt 시간동안에 생긴 y 의 변화량이 Δy 라면 조화진동의 속도는 다음과 같다.

$$v=\frac{\Delta y}{\Delta t}=\omega A\cos\omega t=\omega A\sin(\omega t+\frac{\pi}{2}) \quad \text{조화진동의 속도} \qquad (1)$$

조화진동의 가속도. 마찬가지로 조화진동의 가속도는 단위시간동안에 생긴 속도 v의 변화량으로서 등속원운동하는 구 M의 향심가속도의 y축성분과 같다.(그림 7-19)

향심가속도의 크기는 $a_{향}=\omega^2 A$이므로 조화진동의 가속도의 크기는 다음과 같다.

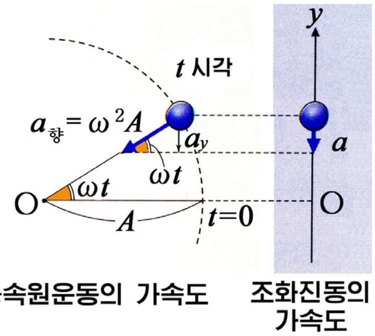


그림 7-19. 조화진동의 가속도

$$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}=-\omega^2 A\sin\omega t=\omega^2 A\sin(\omega t+\pi)=-\omega^2 y \quad \text{조화진동의 가속도} \qquad (2)$$

여기서 ―부호는 가속도의 방향이 항상 변위의 방향과 반대이라는것을 의미한다.

식 1, 2 로부터 조화진동의 속도와 가속도는 변위와 마찬가지로 조화진동한다는것을 알수 있다.(그림 7-20)

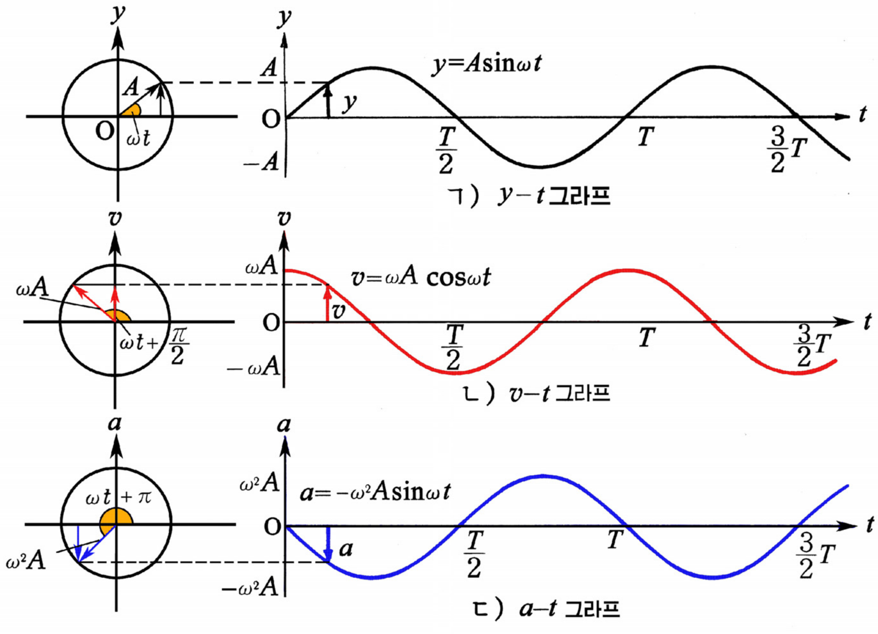


그림 7-20. 조화진동의 변위, 속도, 가속도의 진동그라프

그림에서 보는것처럼 조화진동의 속도는 변위보다 자리각이 $\frac{\pi}{2}$만큼 앞서며 가속도는 변위보다 π만큼 앞선다.

고유진동의 각진동수

뉴톤의 제2법칙으로부터 조화진동하는 물체의 운동방정식은

$$F_{되}=ma=-m\omega^2 y$$

로 된다. 그러므로 물체가 고유진동할 때 진동의 원인인 되돌이힘 $F_{되}$를 알면 고유진동의 각진동수 ω를 구할수 있다.

튐성결수가 k인 용수철흔들이에서 되돌이힘이 $F_{되}=-ky$이므로 웃식으로부터

$$k=m\omega^2$$

이다. 따라서 조화진동하는 용수철흔들이의 각진동수는 다음과 같다.

$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \text{용수철흔들이의 고유각진동수} \qquad (3)$$

조화진동의 에네르기

튐힘과 같은 되돌이힘을 받으면서 진동하는 물체는 력학적에네르기를 가진다.

진동하는 물체의 력학적에네르기를 **진동에네르기**라고 부른다.

조화진동하는 물체의 력학적에네르기는 어떻게 되겠는가.

미끄러운 수평대우에서 용수철흔들이가 진폭 A, 각진동수 ω로 조화진동한다고 하자.(그림 7-21)

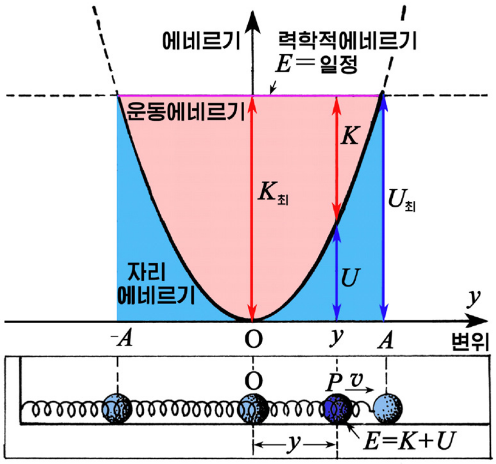


그림 7-21. 조화진동의 진동에네르기(*E-y*그라프)

용수철흔들이의 진동에네르기는 용수철의 튐힘의 자리에네르기 U와 추의 운동에네르기 K로 이루어진다.

$y=A$인 자리에서 $U_{최}=\frac{1}{2}kA^2$, $K=0$이며 추는 되돌이힘에 의하여 평형자리로 운동하면서 튐힘의 자리에네르기는 운동에네르기로 넘어간다.

$y=0$인 자리에서 $U=0$, $K_{최}=\frac{1}{2}mv_0^2$이며 추는 관성에 의하여 평형자리를 지나면서 운동에네르기가 다시 튐힘의 자리에네르기로 넘어간다.

$y=-A$인 자리에서 다시 튐힘의 자리에네르기가 최대로 된다.

용수철흔들이에서 변위와 속도가 조화진동하므로 용수철의 튐힘의 자리에네르기와 추의 운동에네르기는 다음과 같다.

$$U=\frac{1}{2}ky^2=\frac{1}{2}kA^2\sin^2\omega t=\frac{1}{4}kA^2(1-\cos2\omega t)$$

$$K=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}m\omega^2A^2\cos^2\omega t=\frac{1}{4}m\omega^2A^2(1+\cos2\omega t)$$

이처럼 조화진동에서 추의 운동에네르기 K와 용수철의 튐힘의 자리에네르기 U는 2ω의 각진동수를 가지고 서로 반대자리각으로 조화진동한다.(그림 7-22)

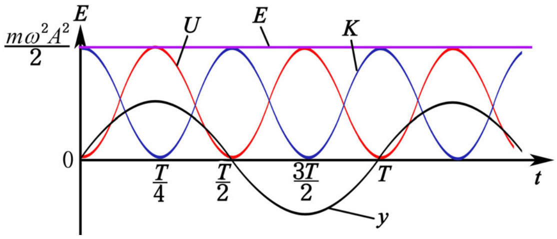


그림 7-22. 진동에네르기의 그라프(E-t그라프)

그러므로 변위가 y인 임의의 점 P에서 진동에네르기는

$$E=K+U=\frac{1}{2}m(\omega A\cos\omega t)^2+\frac{1}{2}m\omega^2(A\sin\omega t)^2=\frac{1}{2}m\omega^2A^2=2\pi^2mA^2\nu^2=\text{일정}$$

으로서 자리에네르기(혹은 운동에네르기)의 최대값과 같다.

$$E_{\text{진}}=2\pi^2mA^2\nu^2=\frac{1}{2}m\omega^2A^2=\text{일정}$$ **진동에네르기**

이처럼 조화진동하는 물체의 진동에네르기는 진동과정에 언제나 보존되며 진동수의 두제곱과 진폭의 두제곱의 적에 비례한다.

문제

1. 틀린 문장을 찾아 고쳐보아라.
   ㄱ) 조화진동에서 속도와 가속도의 방향은 언제나 반대이다.
   ㄴ) 흔들이추의 진동주기가 T이면 추의 운동에네르기의 변화주기도 T이다.
   ㄷ) 조화진동의 진동에네르기는 ω^2에 비례한다.
   ㄹ) 진동하는 물체의 질량을 두배 크게 하면 진동에네르기도 두배 커진다.
   ㅁ) 모든 물체는 고유한 각진동수를 가진다.
2. 튐성결수가 0.15N/m 인 용수철에 매달린 추가 진동식 $y=0.025\sin\pi t$[m]에 따르는 진동을 한다. 평형자리와 변위가 최대인 자리에서 속도와 가속도를 구하여라. 매단 추의 질량은 얼마인가?
3. 튐성결수가 꼭같은 두 용수철에 $m_1:m_2=4:1$ 인 물체들을 매달고 같은 진폭으로 진동시킨다. 두 흔들이에서 $T_1:T_2$, $E_1:E_2$은 얼마인가?

4. 흔들이구의 질량이 2kg이다. 흔들이구가 최대로 변위되였을 때 평형자리로부터의 높이는 0.4cm이고 구가 10번 진동하여 최대변위에 왔을 때 높이는 0.3cm로 되였다. 10번 완전히 진동할 때마다 한번 에네르기를 보충해주어 원래 높이에 되돌아가게 한다면 30번 진동하는 동안에 에네르기를 얼마만큼 보충해주는것으로 되겠는가?

제 4 절. 흔들이의 고유주기

모든 물체는 자기의 고유한 진동수, 진동주기를 가진다.

용수철흔들이의 고유주기

용수철흔들이의 고유주기가 무엇에 관계되는가를 실험으로 알아보자.

실 험

○ 튐성결수와 구의 질량이 각각 같은 두 용수철흔들이를 서로 다른 진폭으로 진동시킬 때 어느 흔들이가 더 빨리 진동하는가를 살펴본다.(그림 7-23의 ㄱ) 두 흔들이는 꼭같이 진동한다.

○ 구의 질량이 다른 두 용수철흔들이를 같은 진폭으로 진동시킬 때 어느 흔들이가 더 빨리 진동하는가를 살펴본다.(그림 7-23의 ㄴ) 질량이 작은 용수철흔들이가 더 빨리 진동한다.

○ 튐성결수가 다른 두 용수철에 같은 질량의 구들을 각각 달고 같은 진폭으로 진동시킬 때 어느 흔들이가 더 빨리 진동하는가를 살펴본다.(그림 7-23의 ㄷ) 튐성결수가 큰 용수철흔들이가 더 빨리 진동한다.

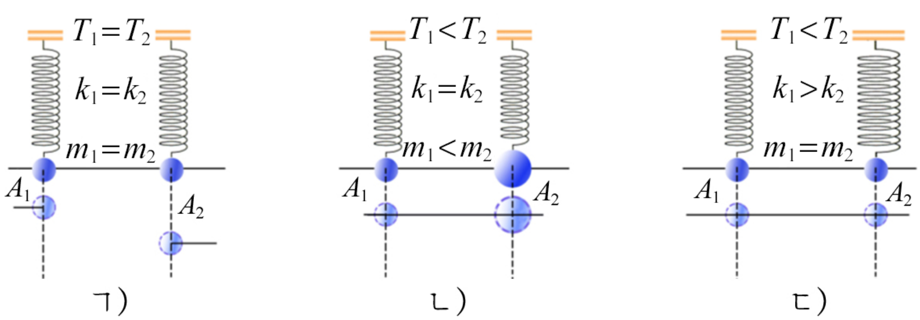


그림 7-23. 용수철흔들이의 진동주기는 구의 질량과 용수철의 튐성결수에 관계된다

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

용수철흔들이의 고유주기는 진폭에는 관계없고 추의 질량이 클수록, 용수철의 퇴성결수가 작을수록 크다는것을 알수 있다.

용수철흔들이의 각진동수가 $\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$ 이고 $\omega=\frac{2\pi}{T}$ 이므로 용수철흔들이의 고유주기는 다음과 같다.

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{용수철흔들이의 고유주기} \qquad (1)$$

즉 용수철흔들이의 진동주기는 매단 물체의 질량의 1/2제곱에 비례하고 퇴성결수의 1/2제곱에 거꿀비례한다.

질점흔들이의 고유주기

흔들이의 등시성. 물체의 질량에 비하여 실의 질량과 늘음을 무시할수 있고 실의 길이에 비하여 매단 물체의 크기가 훨씬 작은 흔들이를 **질점흔들이(수학흔들이)**라고 부른다.

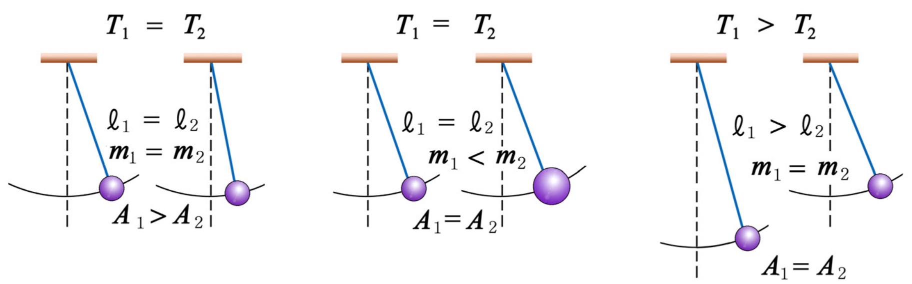
질점흔들이의 진동주기가 무엇에 관계되는가를 실험으로 알아보자.

실험

○ 실의 길이가 같고 추의 질량이 같은 두 흔들이를 서로 다른 진폭으로 진동시켜 진동주기를 비교해보자.(그림 7-24의 ㄱ) 진동주기는 같다.

○ 추의 질량을 다르게 하고 진동주기를 비교해보자.(그림 7-24의 ㄴ) 진동주기는 같다.

○ 흔들이의 길이를 다르게 하고 두 흔들이의 진동주기를 비교해보자.(그림 7-24의 ㄷ) 길이가 길수록 진동주기는 길다.



ㄱ) ㄴ) ㄷ)

그림 7-24. 흔들이의 진동주기는 실의 길이에만 관계된다

이로부터 무엇을 알수 있는가.

흔들이의 진동주기는 오직 실의 길이에만 관계되고 추의 질량이나 진폭에는 관계되지 않는다. 이것이 **흔들이의 등시성**이다.

흔들이의 등시성은 추시계를 만드는 기초원리로 되고있다.(그림 7-25)

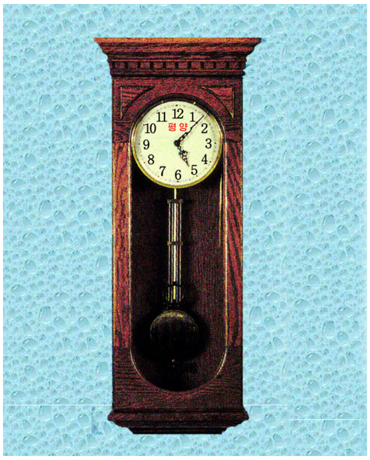


그림 7-25. 추시계

질점흔들이의 고유주기. 질점흔들이의 고유주기는 용수철흔들이의 되돌이힘과 질점흔들이의 되돌이힘을 비교하여 구할수 있다.

그림 7-26에서 추를 평형자리로 되돌려보내는 힘은 중력의 성분힘 $F_{되} = mg\sin\alpha$ 이다.

각 α 가 작을 때에는 추가 평형자리로부터 옮겨간 변위 y가 $\ell\sin\alpha$ 와 같고 되돌이힘이 변위와 반대방향으로 향하므로 $F_{되} = -m\frac{g}{\ell}y$ 로 된다.

용수철흔들이에서 퉘힘과 비교하면

$$F_{되} = -m\frac{g}{\ell}y = -ky$$

이다. 즉 질점흔들이는 퉘성결수가 $k = m\frac{g}{\ell}$ 인 용수철흔들이와 같은 주기로 진동한다고 볼수 있다.

따라서 질점흔들이의 고유주기는 다음과 같다.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad \text{질점흔들이의 고유주기} \qquad (2)$$

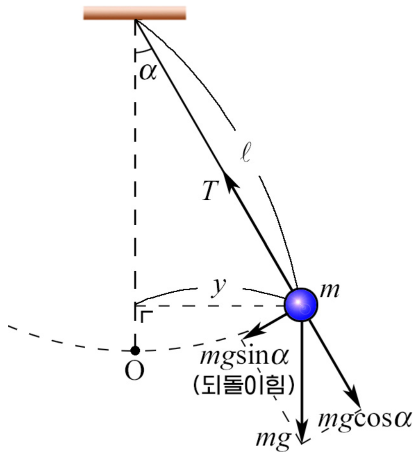


그림 7-26. 질점흔들이의 되돌이힘

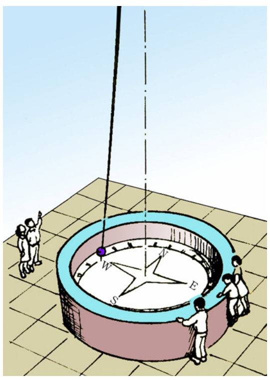
참고

푸코흔들이

질점흔들이를 오래동안 흔들리게 하면 지구의 자전운동에 의하여 그의 진동면이 돌아간다.

실례로 극단한 경우로서 북극에서 질점흔들이를 흔들리게 하면 지구는 서쪽에서 동쪽으로 돌아가므로 진동면은 우에서 내려다보면 시계바늘이 도는 방향으로 돌아가게 된다.

푸코는 1851년에 길이 67m인 실에 28kg인 추를 달고서 이 실험을 하여 지구가 자전운동을 한다는것을 발견하였다. 이 흔들이를 **푸코흔들이**라고 부른다.(그림 7-27)


그림 7-27. 푸코흔들이

즉 질점흔들이의 진동주기는 흔들이의 길이의 1/2제곱에 비례하고 중력가속도의 1/2제곱에 거꿀비례한다.

질점흔들이의 고유주기공식은 흔들이의 등시성을 잘 증명해준다.

※ 질점흔들이의 주기공식으로 계산한 주기와 실지 측정한 주기사이의 오차는 각 α가 작을수록 작아진다.

질점흔들이의 진동주기를 재면 중력가속도 g의 값을 결정할수 있다. 중력가속도값은 위도에 따라 다르며 같은 위도에서도 지각의 조성에 따라 다르다. 무거운 광물들이 매장된 곳은 g의 값이 크고 원유와 같이 밀도가 작은 물질들이 매장된 곳은 g의 값이 작다. 이처럼 중력가속도값을 재여 지하자원을 탐사하는 방법을 **중력탐사법**이라고 부른다.

문 제

1. 질점흔들이의 주기는 2s이다. 다음의 경우에 주기는 얼마로 되겠는가?
   ㄱ) 흔들이의 길이가 처음의 1/4배로 작아졌다.
   ㄴ) 흔들이의 추의 질량이 처음의 1/8배로 작아졌다.
   ㄷ) 흔들이의 진폭이 처음의 1/2배로 작아졌다.
2. 달에서의 중력가속도는 지구에서의 중력가속도의 1/6밖에 안된다. 지구에서 정확한 추시계를 달에 가져가면 분침이 하루에 몇바퀴 돌아가겠는가?
3. 용수철흔들이에서 진동에네르기는 퇸성에네르기와 운동에네르기합으로 표시된다. 용수철흔들이의 고유주기를 력학적에네르기보존의 법칙으로부터 유도하여라.(그림 7-22를 참고하여라.)
4. 질량이 각각 75g인 두 물체로 용수철흔들이와 질점흔들이를 만들었다. 질점흔들이에서 $\ell=0.3$m이면 용수철의 퇸성결수 k가 얼마이여야 두 흔들이의 진동주기가 같겠는가?
5. 지구겉면에서 진동주기가 1s인 흔들이를 얼마만한 높은 곳에 가져가면 진동주기가 2배로 커지겠는가?

제 5 절. 감쇠진동과 공진

지금까지 되돌이힘만을 받으면서 진행되는 리상적인 진동에 대하여 학습하였다. 조화진동에서 진폭이 일정하다는것은 에네르기손실이 없다는것을 의미한다.

그러나 실제한 진동들은 불가피하게 이러저러한 외부힘을 받게 된다.

감쇠진동

공기속에서 진동하는 물체는 진동과정에 공기저항을 극복하면서 일을 하므로 진동에네르기가 점점 줄어들며 진폭도 점차 줄어들어 나중에는 멎고만다.

이처럼 시간이 지남에 따라 진폭이 점점 줄어드는 진동을 **감쇠진동**이라고 부른다.

그림 7-28에서 보는것처럼 감쇠진동에서 저항이 클수록 진폭은 더 빨리 줄어든다.

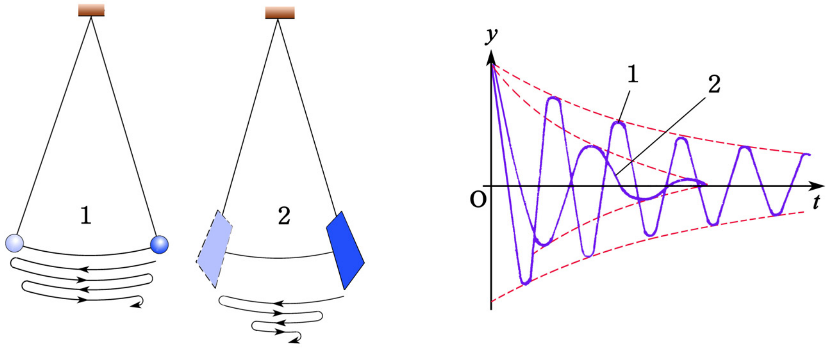


그림 7-28. 감쇠진동의 진동그라프

강제진동

그네를 뛸 때처럼 밖으로부터 주기적인 외부힘이 지속적으로 작용하면 저항력을 극복하는데 소비되는 에네르기가 보충되므로 진동이 계속 진행된다.(그림 7-29)



그림 7-29. 강제진동

이처럼 주기적으로 변하는 외부힘에 의하여 일어나는 진동을 **강제진동**이라고 부른다.

강제진동을 일으키는 주기적인 외부힘을 **강제힘**, 강제힘의 진동수를 **강제진동수**라고 부른다.

강제진동의 진동수와 진폭이 무엇에 관계되는가.

실 험

○ 그림 7-30과 같은 장치에서 손잡이를 일정한 주기로 돌리면서 용수철흔들이의 주기와 비교해본다. 용수철흔들이는 손잡이를 돌리는 주기와 같은 주기로 진동한다.

○ 손잡이를 점점 빨리 돌리면서 용수철흔들이의 진동수와 진폭의 변화를 살펴본다. 진동수가 커지며 진폭도 변한다.

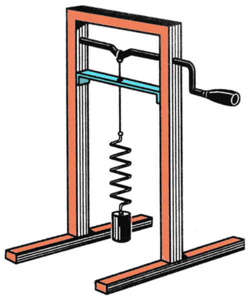


그림 7-30. 강제진동의 주기는 외부힘의 주기와 같다

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

강제진동은 물체의 고유진동수와는 관계없이 강제힘의 진동수와 같은 진동수로 일어나며 진폭은 진동수에 따라 달라진다.

강제진동이 일어나는 과정을 에네르기적으로 따져보자.(그림 7-31)

용수철흔들이에 시누스적으로 변하는 강제힘이 작용하면 처음에는 진폭이 작으므로 공급되는 에네르기가운데 일부가 저항을 극복하는데 소비되고 나머지는 진동에네르기로 축적되여간다. 이에 따라 진폭이 점점 커지게 된다.(과도과정)

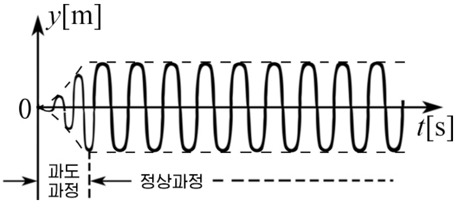


그림 7-31. 강제진동과정

진폭이 커질수록 소비되는 에네르기가 점점 커지며 마침내는 공급된 에네르기가 모두 저항을 극복하는데 소비되고 진동에네르기가 더 이상 커지지 않는다.(정상과정) 그리하여 진폭이 일정한 조화진동이 실현된다.

공 진

강제진동의 진폭은 어떤 때 제일 커지겠는가.

실 험

○ 그림 7-32와 같이 수평으로 늘인 평평한 줄에 몇개의 질점흔들이를 설치한다.

○ 흔들이 1을 진동시키고 다른 흔들이들의 진동과정을 살펴보아라. 흔들이 1과 길이가 꼭같은 흔들이 2의 진폭이 제일 크며 흔들이 4의 진폭이 제일 작다.

※ 질점흔들이의 고유진동수는 흔들이의 길이에 관계된다.

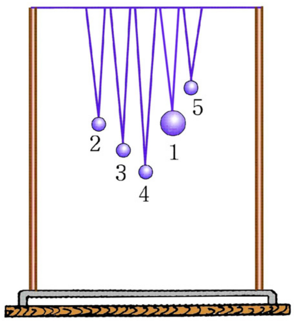


그림 7-32. 흔들이에서의 공진

실험을 통하여 무엇을 알수 있는가.

강제진동수가 물체의 고유진동수와 같을 때 진폭이 특별히 큰 강제진동이 일어나며 그 차이가 클수록 진폭이 더 작다는것을 알수 있다.(그림 7-33)

이처럼 강제진동수가 물체의 고유진동수와 같을 때 진폭이 최대로 커지는 현상을 **공진**이라고 부른다. 진동하는 물체가 저항을 받으면서도 진폭이 줄어들지 않고 계속 진동하려면 저항을 극복하는데 쓴 에네르기를 매주기마다 강제힘이 일을 하여 보충해주어야 한다.

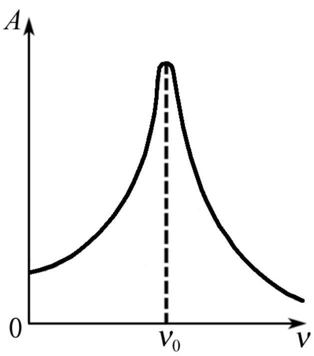


그림 7-33. 강제진동의 진폭과 진동수사이의 관계

정의 일을 하자면 언제나 힘의 방향이 운동방향과 일치해야 하므로 강제힘이 언제나 강제진동하는 물체의 변위보다 자리각이 $\pi/2$만큼 앞서 정의 일을 할 때에만 공진이 일어난다. (그림 7-34)

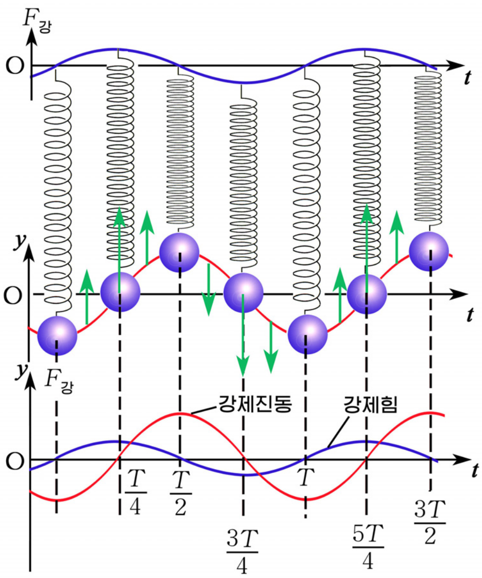


그림 7-34. 공진때 강제힘과 변위의 자리각

이처럼 <u>공진현상은 진동수가 흔들이의 고유진동수와 같고 자리각이 변위보다 $\pi/2$만큼 앞서는 강제힘이 언제나 흔들이의 추를 운동방향으로 밀어줄 때 일어난다.</u>

생활과 기술에서 공진을 잘 고려하여야 한다. 건물이나 다리, 기계 등에서 공진이 일어나면 파괴될수 있다. 기차가 철다리를 지나갈 때 이음짬에 부딪치는 기차바퀴의 충격은 주기적인 강제힘으로 된다. 이 강제힘의 진동수가 철다리의 고유진동수에 가까우면 철다리의 진폭이 커지는데 지어 철다리가 파괴될수도 있다.

기계가 동작할 때 부속품의 운동(례하면 피스톤의 운동과 기계축의 회전)에 의하여 주기적인 강제힘이 생긴다. 강제힘의 진동수가 그 기계 혹은 받친 물체의 고유진동수에 가까우면 공진이 일어나 파손될수 있다.

같은 리치로 건물마다 자기의 고유진동수를 가지고있는데 그것이 지진의 진동수에 가까우면 지진피해를 받을수 있으므로 건물을 설계할 때 지진의 진동수와 건물의 고유진동수가 갈지 않게 해야 하며 될수록 그 차가 크게 설계해야 한다.

일화 다리가 무너진 원인

1831년에 어느 한 나라의 기병부대는 전투에서 이기고 돌아오다가 어느 한 다리를 건너가게 되였다. 기병들이 힘차게 다리를 건너가는데 갑자기 다리중간에서 다리가 와르르 무너져 모두 강물속에 빠져들고말았다. (그림 7-35)



그림 7-35. 다리가 무너진 원인

그 당시 이 현상의 원인을 밝히지 못하고 있다가 수십년이 지나서야 물리학자들이 이 사건을 해명하였다. 다리가 무너진 원인은 무엇이겠는가?



생각하기 기차레루의 길이는 ℓ, 기차차체의 무게는 P이고 기차바퀴에 설치한 용수철의 튐성결수는 k이다. 기차의 속도가 얼마일 때 레루의 이음부에서 바퀴의 충격에 의한 기차차체의 공진이 일어나겠는가?

문 제

1. 다음의 말이 옳은가?
   ㄱ) 강제진동수와 고유진동수가 같으면 항상 공진이 일어난다.
   ㄴ) 외부힘이 작용하면 자유진동은 강제진동으로 된다.
   ㄷ) 공진이 일어날 때 변위와 강제힘은 자리각이 $\pi/2$ 만큼 차이난다.
   ㄹ) 강제진동은 조화진동이다.
2. 강제힘과 진동의 자리각이 같다면 어떤 때는 강제힘이 물체에 진동에네르기를 주고 어떤 때에는 물체가 에네르기를 더 잃는다. 왜 그런가?
3. 길이가 ℓ=0.5m인 질점흔들이에 진폭이 일정한 강제힘을 작용시켜 흔들이의 진폭을 최대로 하자면 강제힘의 진동수가 얼마여야 하겠는가?
4. 공진현상을 리용하여 전기주파수계를 만들었다. 그림에 전기주파수계의 구조를 보여준다.(그림 7-36) 전기주파수계의 동작원리를 설명하여라.

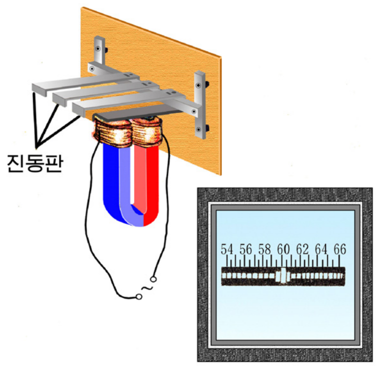


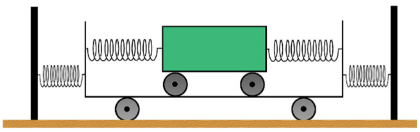
그림 7-36. 전기주파수계

제 6 절. 진동의 합성

진폭, 진동수, 자리각 등이 서로 다른 강제힘들이 동시에 작용하면 여러 진동들이 중첩되여 복잡한 진동을 한다.

여러개의 진동들의 합성진동을 구하는것을 **진동의 합성**이라고 부른다.

진동방향이 같은 두 조화진동이 중첩되면 어떤 진동을 하겠는가.(그림 7-37)


그림 7-37. 진동방향이 같은 두 조화진동의 중첩

진동수가 같은 두 조화진동의 합성

물체가 두 성분조화진동 $y_1 = A_1\sin(\omega_0 t + \varphi_1)$

$$y_2 = A_2\sin(\omega_0 t + \varphi_2)$$

을 동시에 진행한다고 하자. 이때 합성진동은

$$y=y_1+y_2=A_1\sin(\omega_0 t+\varphi_1)+A_2\sin(\omega_0 t+\varphi_2)$$

두 성분조화진동의 진폭벡토르를 $\vec{A}_1$, $\vec{A}_2$ 로 표시하면 $\vec{A}=\vec{A}_1+\vec{A}_2$ 로 구해지는 벡토르 $\vec{A}$ 가 합성진동의 진폭벡토르로 된다.(그림 7-38)

두 조화진동의 진폭벡토르 $\vec{A}_1$ 과 $\vec{A}_2$ 이 꼭같은 각속도 ω_0으로 회전하므로 합성벡토르 $\vec{A}$ 도 역시 같은 각속도 ω_0으로 회전하며 그 크기도 일정하다.

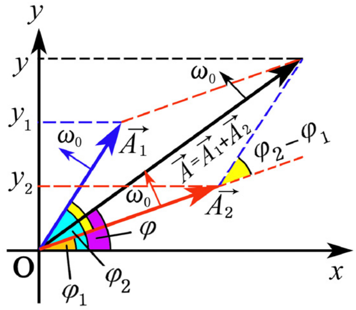


그림 7-38. 합성진동의 진폭벡토르 (ω_0 이 같은 경우)

이것은 합성진동이 각진동수 ω_0 을 가진 조화진동이라는것을 의미한다.

즉 합성진동식은

$$y=A\sin(\omega_0 t+\varphi) \tag{1}$$

로 표시된다. 그림 7-38로부터 합성진동의 진폭 A와 처음자리각 φ를 쉽게 구할수 있다. 즉

$$A\sin\varphi=A_1\sin\varphi_1+A_2\sin\varphi_2$$

$$A\cos\varphi=A_1\cos\varphi_1+A_2\cos\varphi_2$$

로 되며 두 식을 각각 두제곱하여 합하면

$$A=\sqrt{A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)} \tag{2}$$

처음자리각 φ의 tan 값은

$$\tan\varphi=\frac{A\sin\varphi}{A\cos\varphi}=\frac{A_1\sin\varphi_1+A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1+A_2\cos\varphi_2} \tag{3}$$

와 같다. 식 2 에서 보는것처럼 합성진동의 진폭 A는 두 조화진동의 처음자리각차 $\varphi_2-\varphi_1$ 에 관계된다.(그림 7-39)

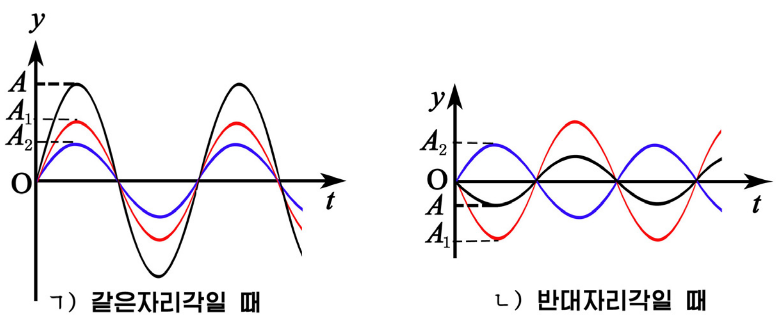


그림 7-39. 합성진동의 진동그라프

그림에서 보는것처럼 처음자리각차가 $\varphi_2-\varphi_1=2k\pi$이면 합성진동의 진폭은 $A=A_1+A_2$로 된다.(그림 7-39의 ㄱ)

처음자리각차가 $\varphi_2-\varphi_1=(2k+1)\pi$이면 합성진폭은 $A=|A_1-A_2|$이다.(그림 7-39의 ㄴ)

처음자리각차가 $0<\varphi_2-\varphi_1<\pi$이면 $|A_1-A_2|<A<|A_1+A_2|$이다.

특히 $\varphi_2-\varphi_1=(2k+1)\dfrac{\pi}{2}$이면 $A=\sqrt{A_1^2+A_2^2}$ 이다.

진동수가 다른 두 조화진동의 합성

진동수가 다른 두 조화진동을 합성하면 두 진폭벡토르 $\vec{A}_1$과 $\vec{A}_2$의 각속도가 ω_1과 ω_2로서 서로 다르므로 합성진동의 진폭벡토르 $\vec{A}$의 크기는 시간에 따라 커졌다작아졌다한다.

두 진폭벡토르가 겹쳐지는 순간부터 진동을 살핀다면 두 조화진동은

$y_1=A_1\sin\omega_1 t$ 와 $y_2=A_2\sin\omega_2 t$ 로 표시되며 이때 합성진동은

$$y=y_1+y_2=A_1\sin\omega_1 t+A_2\sin\omega_2 t$$

로 된다.

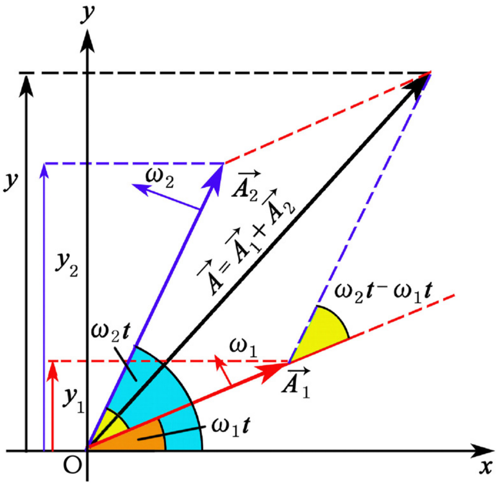


그림 7-40. 합성진동의 진폭벡토르 (ω가 다른 경우)

그림 7-40에서 보는것처럼 합성진동의 진폭은

$$A=\sqrt{A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos(\omega_2-\omega_1)t} \qquad (4)$$

와 같다. 식 4에서 보는것처럼 합성진동은 진폭이 시간에 따라 변하므로 조화진동이 아니라 복잡한 형태의 진동으로 된다.

만일 두 조화진동의 진폭이 $A_0=A_1=A_2$이고 각진동수 ω_1과 ω_2가 약간 다른 두 조화진동을 합성하면 합성진동의 진폭 A는

$$A=2A_0\left|\cos\frac{\omega_2-\omega_1}{2}t\right|=2A_0\cos\omega_{맥}t \quad \text{맥노리진폭} \qquad (5)$$

로 된다. 또한 t시각에 합성진동의 진폭벡토르의 회전각이 $\dfrac{\omega_1+\omega_2}{2}t$ 로 되므로 합성진동식은

$$y=A\sin\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t=2A_0\left|\cos\frac{\omega_2-\omega_1}{2}t\right|\sin\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t$$

로 표시된다.

즉 $\omega_1 \approx \omega_2$이면 식 5로부터 합성진동의 진폭 A가 주기적으로 느리게 변하는 복잡한 비조화진동을 한다.

이처럼 진동수가 약간 다른 두 진동이 중첩되여 합성진동의 진폭이 매우 천천히 주기적으로 커졌다작아졌다하는 현상을 **맥노리**라고 부른다.

그림 7-41에 진동수 ν_1과 ν_2가 약간 다른 두 진동의 진동그라프(ㄱ, ㄴ)와 합성진동의 진동그라프(ㄷ)를 보여주었다.

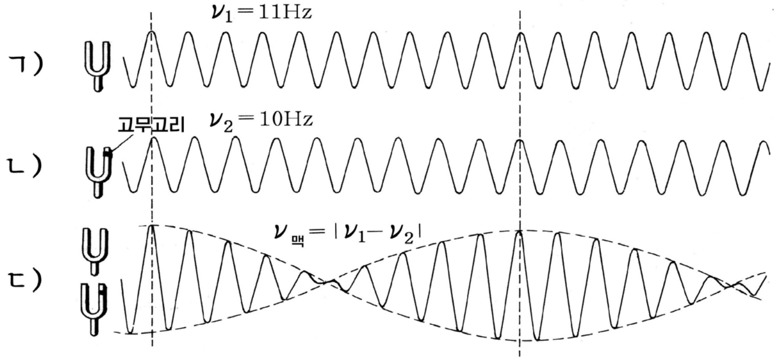


그림 7-41. 맥노리

그림에서 합성진폭이 최대로 되는 시각들사이의 시간 T를 **맥노리주기**라고 부른다.

맥노리주기는 합성진동의 진폭변화주기의 절반과 같으므로 식 5로부터

$$T_{맥} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{\omega_{맥}} = \frac{2\pi}{|\omega_2 - \omega_1|} = \frac{1}{|\nu_2 - \nu_1|}$$

자료

조화분석

각진동수의 비가 $\omega_1 : \omega_2 = 1:2$ 인 두 조화진동을 합성하면 합성진동은 ω_1 의 진동수로 진동한다.(그림 7-42 의 ㄱ)

첫 조화진동의 각진동수의 3배, 4배,…의 조화진동들을 합성하여도 ω_1의 진동수로 진동하는 복잡한 진동을 얻는다.(그림 7-42의 ㄴ)

거꾸로 하나의 복잡한 진동을 수많은 조화진동들로 나누는것을 **조화분석**이라고 부른다.

이때의 조화진동가운데서 진동수가 가장 작은것을 **기본진동**, 그밖의 진동수를 가진 진동들을 **배진동**이라고 부른다.

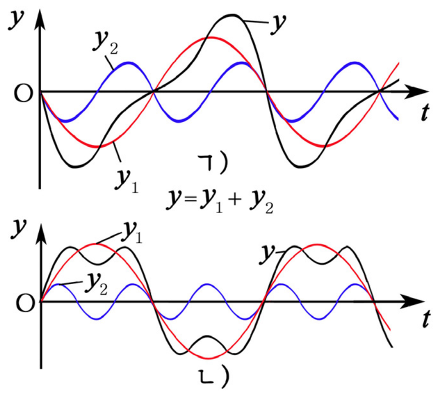


그림 7-42. 각진동수가 2, 3배 차이나는 두 조화진동의 합성

이로부터 맥노리진동수 $\nu_{맥}$ 은

$$\nu_{맥}=\frac{1}{T_{맥}}=|\nu_1-\nu_2| \quad \textbf{맥노리진동수} \qquad (6)$$

로 된다. 즉 맥노리진동수는 두 진동의 진동수의 차와 같다.

맥노리현상은 생활과 기술에서 널리 리용한다. 손풍금이나 기타를 비롯한 악기의 음을 맞출 때 그의 진동수와 비슷한 표준음과 합성하여 맥노리를 만들고 합성음이 변하지 않을 때까지 조절하면 된다.

어떤 물체의 진동수를 재려면 그의 진동수와 비슷한 표준진동을 그 물체의 진동과 합성하여 맥노리를 만들고 맥노리의 진동수를 재여 공식을 리용하면 된다.

[례제] 진폭이 각각 A_1=10cm, A_2=16cm이고 각진동수가 같은 두 조화진동을 합성하면 합성진동의 진폭은 14cm로 된다.(그림 7-43) 성분조화진동들의 자리각차를 구하여라.

풀이. 주어진것: A_1=10cm

A_2=16cm

A=14cm

구하는것: $\varphi_2-\varphi_1$?

합성진동의 진폭공식으로부터

$$A=\sqrt{A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)}$$

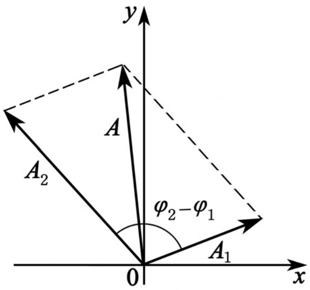


그림 7-43

따라서

$$\cos(\varphi_2-\varphi_1)=\frac{A^2-A_1^2-A_2^2}{2A_1A_2}=\frac{14^2-10^2-16^2}{2\times10\times16}=-\frac{1}{2} \rightarrow \varphi_2-\varphi_1=120°$$

답. 120°

문제

1. 다음의 문장가운데서 옳고 그른것을 찾고 그 근거를 밝혀라.

ㄱ) 두 조화진동을 합성하면 합성진동도 조화진동이다.

ㄴ) 각진동수와 진폭이 각각 비슷한 두 조화진동을 합성하면 맥노리가 생긴다.

ㄷ) 자리각차가 령이고 진폭이 같은 두 조화진동을 합성하면 합성진동은 주기와 진폭이 성분조화진동의 두배이다.

ㄹ) 자리각차가 π이고 진폭이 같은 두 조화진동을 합성하면 합성진동은 조화진동이다.

ㅁ) 음악에서 기준음으로 쓰이는 <라>음(ν_1=440Hz)과 <쏠>음(ν_2=392Hz)을 합성하면 맥노리가 얻어진다.

2. 세개의 조화진동 $y_1=0.03\sin\omega t$, $y_2=0.03\cos\omega t$, $y_3=0.02\sin(\omega t+\pi)$를 합성하면 합성진동의 진동식은 어떻게 표시되는가?

3. 하나의 원안에서 같은 각속도로 서로 반대방향으로 도는 꼭같은 두개의 반경벡토르를 합성하면 합성벡토르의 크기는 시간에 따라 어떻게 변하겠는가?(그림 7-44)

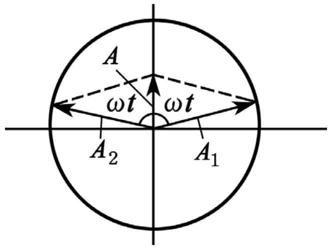


그림 7-44



문제. 진동의 합성을 콤퓨터로 모의할수 있도록 프로그람을 작성하여보아라.

방향. · 같은 방향으로 진동하는 진동수가 같거나 다른 두 진동을 합성하는 프로그람을 작성하여보아라.

· 서로 수직으로 진동하는 진동수가 같은 두 진동을 합성하는 프로그람을 작성하여보아라.

· 두 진동들의 진동수차, 진폭차, 처음자리각차에 따라서 합성진동이 어떻게 되는가를 콤퓨터화면상에서 관찰하고 결과를 해석하여보아라.

복습문제

1. 20g의 분동을 매달면 3cm 늘어나는 용수철이 있다. 그 웃끝을 고정시키고 아래끝에 5g의 추를 더 달고 0.5cm만큼 당겼다놓으면 추는 진동한다. 추를 매달지 않았을 때 용수철의 아래끝으로부터 4.25cm, 3.75cm, 3.25cm 되는 곳에서 되돌이힘의 크기와 방향을 결정하여라.

(**답**. 0.033N 우로, 0, 0.033N 아래로)

2. 그림 7-45와 같이 $r=5\text{cm}$ 떨어져있는 두 점 A와 B에 $q_A=q_B=2\times10^{-13}\text{C}$을 가진 대전체들이 놓여있다. 그사이의 중심에 $q_0=-5\times10^{-13}\text{C}$인 구를 놓고 드림선방향으로 약간 옮겼다놓으면 대전체는 드림선방향에서 진동한다. 평형자리로부터 0.1mm 떨어진 점에서 되돌이힘을 구하여라.

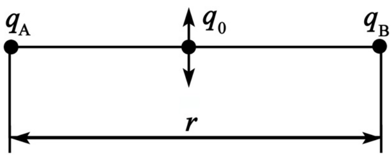


그림 7-45

(**답**. 11.5×10^{-15}N)

3. $y=3.5\sin(16\pi t+\frac{\pi}{4})$[cm]로 표시되는 진동그라프를 그리여라. 다음 진폭, 각진동수, t=0일 때와 t=3s가 되는 순간의 자리각, t_1=1s, t_2=4s사이의 자리각변화 및 이 동안에 질점이 움직인 거리를 구하여라.

(**답**. 3.5cm, 16πrad/s, π/4, 48.25π, 48π, 3.36m)

4. 한 질점이 직선우에서 진폭 24mm, 진동주기 4s로 진동한다. $t=0$인 순간에 질점은 평형자리로부터 ㅡ방향으로 12mm 되는 점에서 평형자리를 향하여 움직이고있다. 이 조화진동식을 쓰고 진동그라프를 그리여라.

(답. $y=24\sin(\frac{\pi}{2}t-\frac{\pi}{6})$ [mm])

5. 조화진동에 대하여 다음의 문장이 옳은가?
   ㄱ) 되돌이힘의 방향은 언제나 평형자리로 향한다.
   ㄴ) 평형자리로 다가올수록 더 빨리 운동하므로 가속도가 커진다.
   ㄷ) 가속도의 방향은 속도의 방향과 같을 때도 있고 반대될 때도 있다.
   ㄹ) 속도의 방향은 변위의 방향과 같다.

6. 반경이 A인 원자리길을 따라 질점 M이 크기가 v 인 속도로 등속원운동을 한다. $t=0$인 순간 이 질점은 P점으로부터 S_0만큼 지난 자리인 Q점을 지난다.(그림 7-46)
   ㄱ) 질점 M이 x축과 y축에 던지는 그림자들의 진동식을 세우라.
   ㄴ) 두 진동의 자리각차는 얼마인가?
   ㄷ) 질량이 m인 추를 단 용수철흔들이로 x축에 던지는 그림자의 운동과 같은 진동이 일어나게 하려면 용수철의 튐성결수는 얼마로 되여야 하는가?

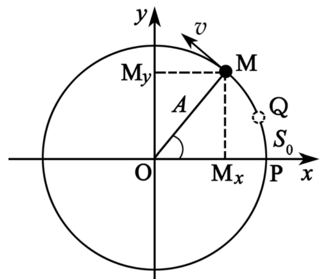


그림 7-46

(답. ㄱ) $x=A\sin(\frac{v}{A}t+\frac{S_0}{A}+\frac{\pi}{2})$, $y=A\sin(\frac{v}{A}t+\frac{S_0}{A})$ ㄴ) $\frac{\pi}{2}$ ㄷ) $\frac{mv^2}{A^2}$)

7. 질량이 2kg인 물체가 y축에서 진동한다. 이 물체에 작용하는 힘은 F=−0.5y[N]이고 진폭이 0.14m라면 이 물체의 변위, 속도 및 가속도는 시간에 따라 어떻게 변하겠는가? 이 물체의 진동에네르기는 얼마인가? 물체가 평형자리를 지나는 순간부터 고찰하여라.

(답. $y=0.14\sin 0.5t$, $v=0.07\sin(0.5t+\frac{\pi}{2})$, $a=0.035\sin(0.5t+\pi)$, 0.004 9J)

8. 질점이 진폭 2cm, 진동수 5Hz, 처음자리각이 30°인 조화진동을 하는 경우 질점의 속도와 가속도의 최대값은 얼마인가? 그리고 $t=0.1$s인 때 속도와 가속도는 얼마인가?

(답. 0.628m/s, 19.72m/s^2, −0.544m/s, 9.86m/s^2)

9. 웃끝을 고정한 용수철에 질량이 m[kg]인 추를 달고 F[N]만 한 힘으로 A[m]만큼 아래로 당겼다 놓아주면 아래우로 떤다.
   ㄱ) 추가 평형자리로 돌아가는 시간과 평형자리를 지나는 순간의 속도는 얼마인가?
   ㄴ) 추를 놓아준 순간부터 고찰할 때 추의 진동식을 구하여라.
   ㄷ) $m=8.5\times10^{-2}$ kg, F=0.9N, A=0.12m이라면 진동수는 얼마인가?

(답. ㄱ) $\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{mA}{F}}$, $\sqrt{\frac{FA}{m}}$ ㄴ) $y = A\sin\left(\sqrt{\frac{F}{mA}}t - \frac{\pi}{2}\right)$ ㄷ) 1.5Hz)

10. 질량이 10g인 질점의 진동식은 $y=5\sin(\frac{\pi}{5}t+\frac{\pi}{4})$ [m]이다. 질점에 가해지는 힘의 최대값과 진동에네르기의 크기, 변화주기를 구하여라.

(답. 0.02N, 0.05J, 5s)

11. 1cm의 진폭을 가지고 조화진동하는 질량이 2kg인 물체가 진동중심으로부터 0.5cm 떨어진 위치 P에 있을 때 4N의 힘이 작용한다. 진동의 주기와 P점에서 물체의 속도, 평형자리를 지날 때의 속도를 구하여라.

(답. 0.314s, 0.17m/s, 0.2m/s)

12. 그림 7-47과 같은 장치에서 물체 M은 축을 따라 마찰없이 움직일수 있다. 두 용수철이 꼭같을 때 이 장치를 ω의 각속도로 돌려 질량이 m인 물체 M을 진동시킬 때 진동주기를 구하여라.

(답. $\frac{2\pi}{\sqrt{\frac{2k}{m}-\omega^2}}$)

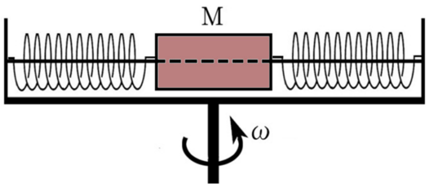


그림 7-47

13. 질량이 m=0.2kg인 액체밀도계를 어떤 액체우에 띄웠다. 이것을 액체속에 잠그었다놓으면 T=3.4s의 주기로 떤다. 진동을 조화진동으로 보고 액체의 밀도를 구하여라. 이 액체밀도계의 직경은 D=1cm이다. (답. 887kg/m^3)

14. 튐성결수가 k인 두 용수철을 직렬로 잇고 추 한개를 달았을 때와 두 용수철을 병렬로 잇고 같은 추를 달았을 때 용수철흔들이의 고유진동수는 용수철이 하나인 때의 몇배로 되겠는가?

(답. $\frac{1}{\sqrt{2}}$, $\sqrt{2}$)

15. 어떤 질점흔들이는 질량이 m_1이고 반경이 R_1인 별에서는 주기가 T_1인 조화진동을 하고 질량이 m_2이고 반경이 R_2인 별에서는 주기가 T_2인 조화진동을 한다. T_1/T_2을 구하여라.

(답. $\sqrt{\frac{m_2R_1^2}{m_1R_2^2}}$)

16. 튐성결수가 k_1=10N/m, k_2=15N/m인 두 용수철 A, B와 질량이 m=50g인 추 C가 있다.

ㄱ) 그림 7-48의 ㄱ와 같이 량끝을 고정한 용수철흔들이의 고유주기를 구하여라.

ㄴ) 그림 7-48의 ㄴ와 같이 드리운 용수철흔들이의 고유주기는 얼마인가?

(답. ㄱ) 0.28s ㄴ) 0.57s)

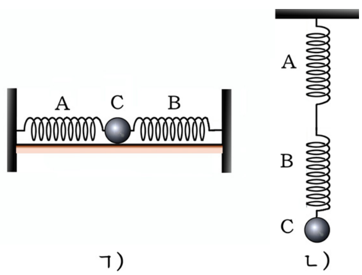


그림 7-48

17. 추가 1s에 한번씩 떨 때 정확히 맞는 벽시계가 하루에 3min씩 떠진다. 추를 오르내리는 나사의 걸음이 0.25mm이라면 이 나사를 몇바퀴 돌려야 시계가 맞겠는가?

(답. 4)

18. 우주운반로케트의 앞단에 진동주기가 꼭같은 질점흔들이와 용수철흔들이를 설치하였다. 발사가속도 g로 드림선방향으로 발사했을 때 다음의 문장에서 옳은것을 찾아라.

ㄱ) 주기는 다같이 2배로 되였다.

ㄴ) 주기는 다같이 변하지 않는다.

ㄷ) 질점흔들이의 주기는 변하지 않고 용수철흔들이의 주기는 2배로 되였다.

ㄹ) 용수철흔들이의 주기는 변하지 않고 질점흔들이의 주기는 $1/\sqrt{2}$ 배로 되였다.

19. 흔들이의 길이가 24.85cm인 흔들이를 승강기안에 설치하였다. 승강기가 a=2.5m/s^2, a=g의 가속도로 각각 아래로 내려올 때 흔들이주기는 얼마인가?

(답. 1.15s, 무한대)

20. 공기속에 설치한 질점흔들이는 공기의 저항때문에 멎고만다. 만일 이 흔들이를 진공속에 설치하면 어떻게 되겠는가? 왜 그런가?

21. 려객뻐스에 설치되여있는 손잡이가죽의 길이는 22cm이다. 뻐스가 달릴 때 차체의 진동주기가 0.05s라면 손잡이의 진폭이 최대로 되겠는가?

(답. 최대로 되지 않는다.)

22. 그림 7-49는 어떤 질점흔들이의 공진곡선이다.

ㄱ) 이 흔들이의 길이는 얼마인가?

ㄴ) 흔들이의 길이를 길게 하면 공진곡선의 마루가 어떻게 이동하겠는가?

(답. ㄱ) 2.76m ㄴ) 왼쪽)

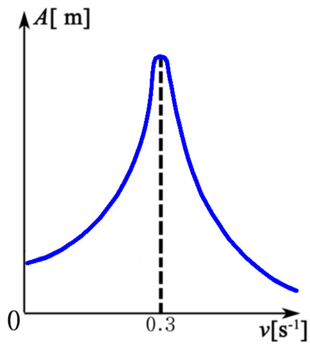


그림 7-49

23. 길이가 $\ell=1$m인 흔들이를 드림선으로부터 α=30°만큼 기울였다가 놓아준다. 평형자리를 지나는 순간 실의 중간이 못에 걸려 길이가 절반인 흔들이로 된다.(그림 7-50) 이 흔들이의 주기와 최고높이에 이르렀을 때 드림선과 실사이의 각 β를 구하여라.

(답. 1.71s, 42.9°)

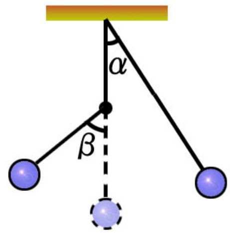


그림 7-50

24. m=5kg인 물체가 용수철과 부딪쳤다. 충돌전 속도가 v=2.5m/s, 용수철의 튕성결수가 k=85N/m라면 용수철이 얼마나 압축되였겠는가? 반대방향으로 튀여나올 때까지의 용수철과의 접촉시간은 얼마인가?

(답. 0.6m, 0.76s)

25. 진동수가 340Hz, 345Hz인 두 음원 A, B가 있다. 다른 음원 C를 A와 동시에 울리게 하면 $v_{\text{맥}1}$=4Hz이고 B와 동시에 울리게 하면 $v_{\text{맥}2}$=1Hz이다. 음원 C의 진동수는 얼마인가?

(답. 344Hz)

26. 다음의 진동들을 합성하여라.

ㄱ) $y_1=A\cos\omega t$, $y_2=A\cos(\omega t+\frac{\pi}{2})$

ㄴ) $y_1=A\sin\omega t$, $y_2=A\sin(\omega t+\frac{\pi}{3})$

(답. ㄱ) $y=\sqrt{2}A\cos(\omega t+\frac{\pi}{4})$ ㄴ) $y=\sqrt{3}A\sin(\omega t+\frac{\pi}{6})$)

27. 각진동수가 조금 차이나는 두개의 조화진동을 합성하여 $y=A\cos 2t\cdot\sin 50t$의 합성진동을 얻었다. 성분진동들의 각진동수와 맥노리주기를 구하여라.

(답. 52rad/s, 48rad/s, 1.57s)

28. 다음의 성분진동들을 합성한 합성진동의 그라프를 VB로 작성하고 그라프모양을 그려라.

$$y=49.6\sin(\omega+302°)+17.4\sin(2\omega+298°)+13.8\sin(3\omega+195°)+$$
$$+7.1\sin(4\omega+215°)+4.5\sin(5\omega+80°)+0.6\sin(6\omega+171°)+$$
$$+2.7\sin(7\omega+34°)+0.6\sin(8\omega+242°)+1.6\sin(9\omega+331°)+$$
$$+1.3\sin(10\omega+208°)+0.3\sin(11\omega+89°)+0.5\sin(12\omega+229°)+$$
$$+0.7\sin(13\omega+103°)+0.3\sin(14\omega+305°)+0.4\sin(15\omega+169°)+$$
$$+12.8\cos(6.5\omega+150°)$$

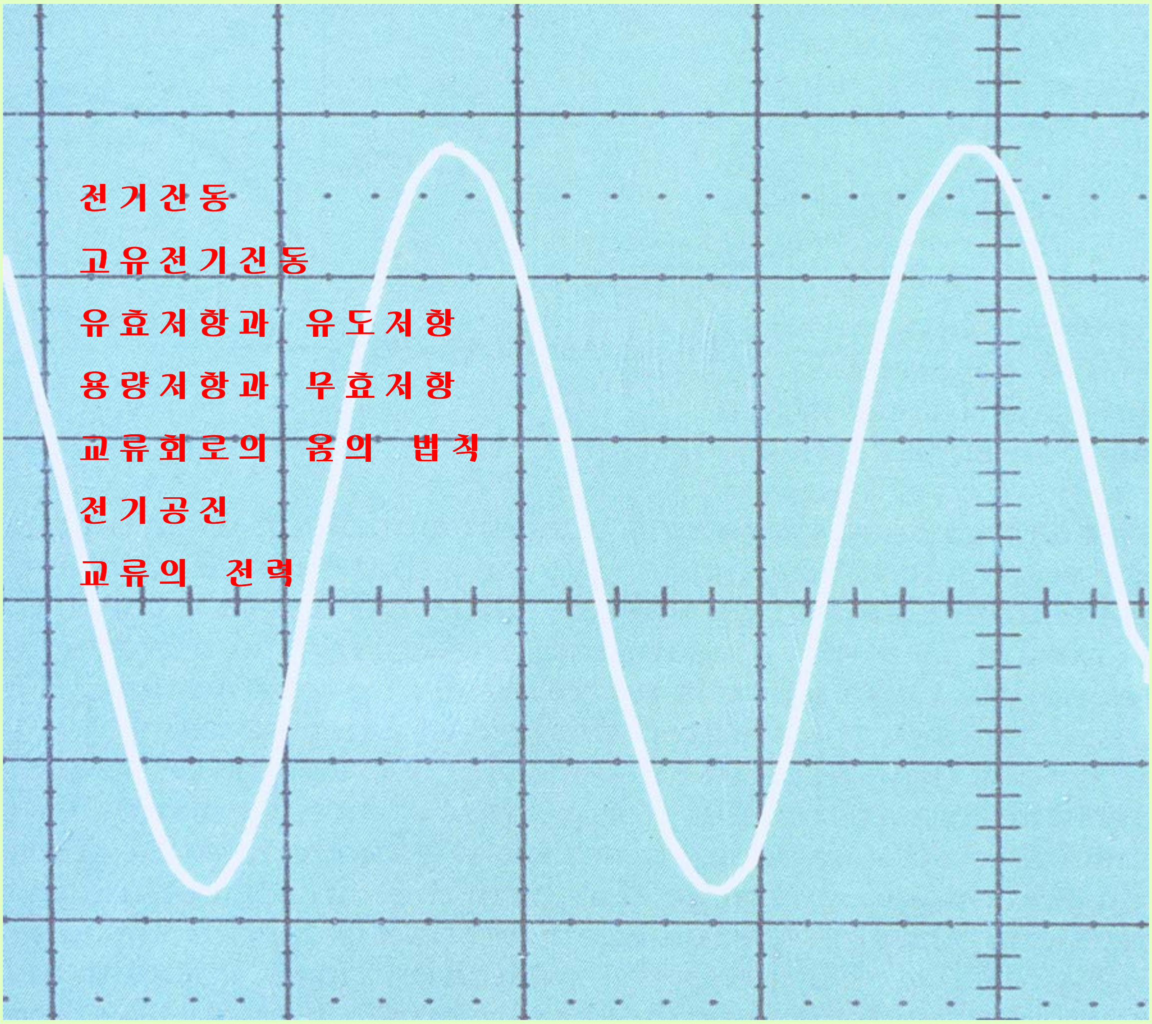
제 8 장. 전기진동과 교류

인민경제 여러 부문과 가정생활에 이르기까지 전기를 쓰지 않는데는 하나도 없다.

과학과 기술이 발전하면서 전기는 인민경제의 동력으로뿐만아니라 무선통신을 비롯한 정보전달의 중요한 수단으로 되고있다.

이 장에서는 전파통신의 기초로 되는 전기진동과 교류전동기를 비롯한 교류회로에 흐르는 전류법칙, 교류전력과 전기절약의 방도에 대하여 학습하게 된다.

교류에 대한 지식은 전파통신, 전기공학, 전자공학뿐아니라 일상생활에서도 반드시 알아야 할 기초지식으로 된다.



제 1 절. 전기진동

력학적진동과 마찬가지로 전기회로에서도 전기량(q), 전압(u), 전류(i)를 비롯한 전기적량들이 주기적으로 변화될수 있다.

전기진동

전기용량이 C인 축전기와 유도결수가 L인 선륜으로 이루어진 전기회로에서 전기적량들의 변화과정을 실험으로 알아보자.

실 험

○ 축전기 C와 선륜 L를 그림 8-1과 같이 련결하고 스위치 K를 A쪽에 넣어 축전기를 충전시킨다.

○ 다음 스위치 K를 B쪽으로 옮겨 선륜을 통하여 방전시키면서 오씰로그라프의 형광막을 살펴본다. 오씰로그라프의 형광막에 진폭이 변하는 진동그라프가 나타난다.

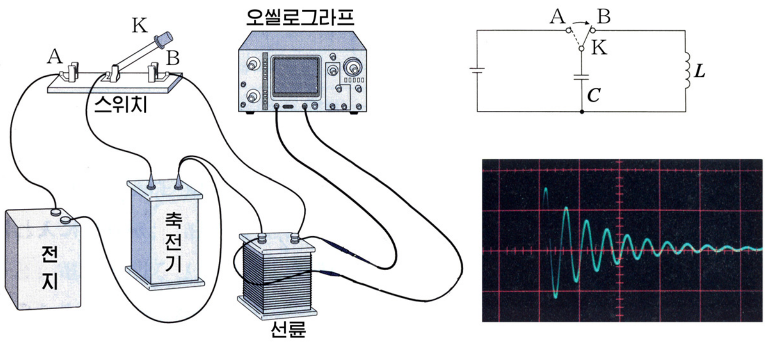


그림 8-1. 전기진동

여기로부터 무엇을 알수 있는가.

축전기의 두 극판에 걸리는 전압의 크기와 방향이 주기적으로 변한다는것을 알수 있다.

축전기에서 전기량은 전압에 비례한다.($q=CU$)

그러므로 축전기에 걸리는 전압뿐아니라 전기량과 극판사이의 전기마당, 선륜에 흐르는 전류와 선륜주위에 생기는 자기마당도 주기적으로 변한다는것을 알수 있다.

이처럼 축전기 C와 선륜 L를 포함한 회로에서 전기적량들의 주기적인 변화를 **전기진동**이라고 부른다.

전기진동이 일어나는 과정을 구체적으로 설명하자.(그림 8-2)

스위치를 B에 옮겨놓는 시각을 $t=0$으로 하고 이때 축전기에 걸린 전압을 u_0,

축전기에 쌓인 전기량을 q_0이라고 하자.(그림 ㄱ)

다음 순간부터 축전기의 전기량이 방전하면서 선륜 L를 통하여 전류가 흐른다.(그림 ㄴ) 이때 선륜 L에 전류의 증가를 방해하는 유도전동력이 생기므로 전류는 천천히 커진다.

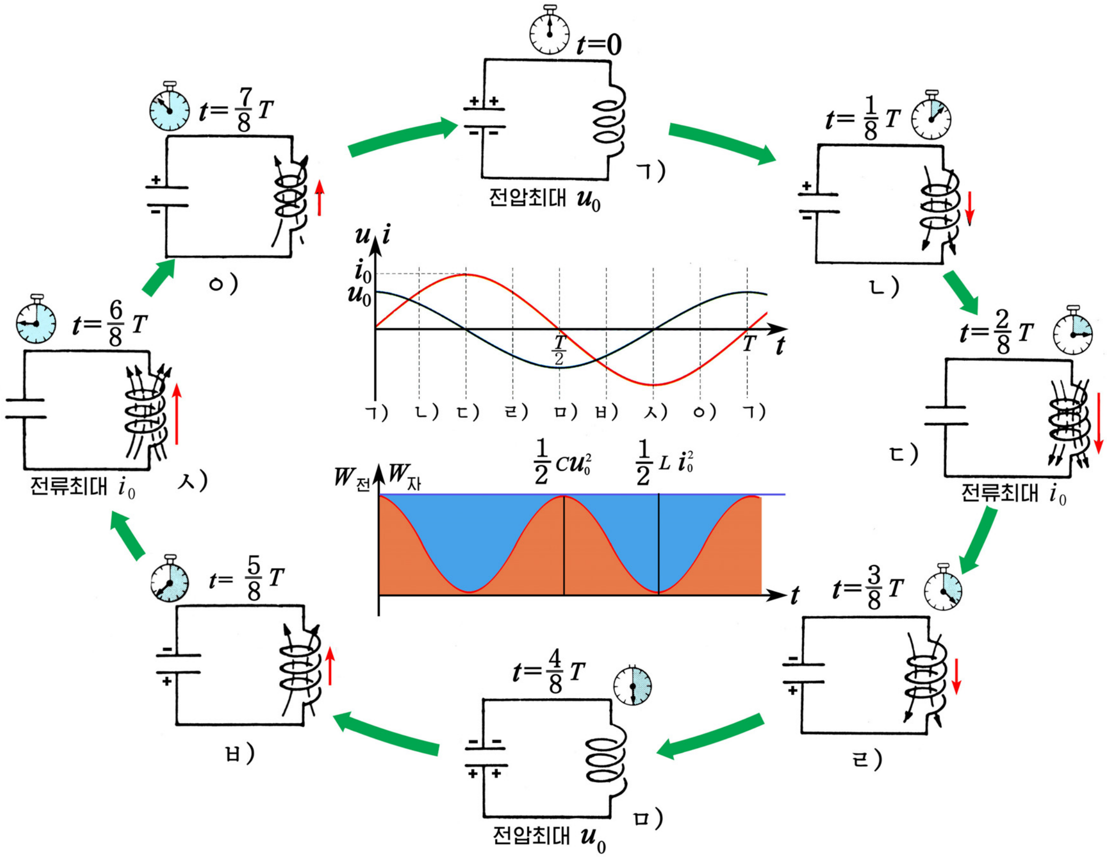


그림 8-2. 전기진동과정

전기량이 전부 방전하면 전기량 q와 전압 u는 령으로 되며 전류 i는 최대값 i_0에 이른다.(그림 ㄷ)

이어 전류가 감소하는데 이에 따라 선륜 L에 전류의 감소를 방해하는 유도전동력이 생기므로 전류는 같은 방향으로 계속 흐르면서 천천히 줄어든다.(그림 ㄹ)

이 전류는 축전기를 처음과 반대의 부호로 충전시킨다.

전류가 령에 이를 때 충전이 끝나고 전기량 q와 전압 u는 반대부호의 최대값 $-q_0$과 $-u_0$에 이르게 된다.(그림 ㅁ)

다음에는 축전기가 다시 방전(그림 ㅂ, ㅅ)되였다가 충전(그림 ㅇ)되면서 처음상태로 돌아간다. 이러한 과정이 주기적으로 반복되는것이 전기진동이다.

그림에서 보는것처럼 전기진동과정에 축전기극판사이에 생기는 전기마당과 선륜에 생기는 자기마당도 주기적으로 변한다.

력학적진동과 마찬가지로 전기진동에도 자유전기진동과 강제전기진동이 있다.

그림 8-1에서 보는것처럼 축전기가 한번 충전된 후에 저절로 일어나는 전기진동을 **자유전기진동**이라고 부른다.

생각하기 자유전기진동이 계속되지 않고 인차 멎게 되는것은 무엇때문인가?

전기진동회로

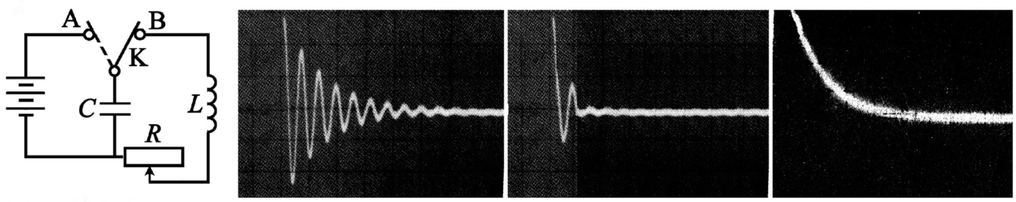
전기진동이 어떤 회로에서 일어나겠는가.

실험

앞의 실험에서 가변저항 R를 더 련결하고 저항값을 변화시키면서 오씰로그라프의 형광막을 살펴보자.(그림 8-3)

○ 가변저항 R를 최소로 놓고 오씰로그라프를 살펴보아라. 전압진폭이 천천히 작아진다.(그림 8-3의 ㄱ)

○ 가변저항 R를 점점 크게 하면서 오씰로그라프를 살펴보아라. 전압진폭이 점점 빨리 작아지다가 저항이 어떤 값이상으로 커지면 진동이 일어나지 않는다.(그림 8-3의 ㄴ, ㄷ)



ㄱ)　　　　ㄴ)　　　　ㄷ)

그림 8-3. 진동회로에서 저항 R에 따르는 진동그라프

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

전기회로에 저항이 있으면 전류가 흐를 때 줄열이 발생하면서 에네르기손실이 생기기때문에 전기진동의 진폭이 시간이 지남에 따라 줄어든다.

저항 R가 너무 크면 에네르기손실이 커지므로 자유전기진동이 일어나지 않는다.

그러므로 전기진동이 일어나자면 전기회로에 전기용량이 C인 축전기와 유도결수가 L인 선륜이 있어야 하며 저항 R는 될수록 작아야 한다.

이처럼 전기진동이 일어나도록 축전기와 선륜으로 이루어진 전기회로를 **진동회로**(혹은 **LC회로**)라고 부른다.

[례제] 진동회로에서 한주기동안에 전기량, 전압, 전류, 전기마당, 자기마당의 변화를 $T/8$순간마다 "증가", "감소", "최대", "령"으로써 표에 써넣어라.

풀이. 시간을 $T/8$간격으로 표시하면 다음과 같다.

시 간 t	전기량 q	전 압 u	전 류 i	전기마당 $W_{전}$	자기마당 $W_{자}$
0	q_0	u_0	0	최대	0
$T/8$	+감소	+감소	+증가	감소	증가
$T/4$	0	0	i_0	0	최대
$3T/8$	-증가	-증가	+감소	증가	감소
$T/2$	$-q_0$	$-u_0$	0	최대	0
$5T/8$	-감소	-감소	-증가	감소	증가
$3T/4$	0	0	$-i_0$	0	최대
$7T/8$	+증가	+증가	-감소	증가	감소
T	q_0	u_0	0	최대	0

문 제

1. 다음의 문장들에서 옳은것을 찾아보아라.
   ㄱ) 전기용량이 C인 축전기와 유도결수가 L인 선륜으로 닫긴 전기회로를 만들면 전기진동이 일어난다.
   ㄴ) 진동회로에서 전기량이 진동하면 축전기의 전기용량 C와 선륜의 유도결수 L도 진동한다.
   ㄷ) 자유전기진동이 일어날 때 전압과 전류의 자리각차는 령이다.
   ㄹ) 한번 충전된 전기량에 의하여 끝없이 계속되는 전기진동은 없다.
2. 회로에 축전기나 혹은 선륜이 들어있지 않아도 자유전기진동이 일어나겠는가? 왜 그런가?
3. 진동회로의 저항 R가 령으로 되면 자유전기진동은 어떻게 되겠는가? 또 그렇게 될수 있겠는가?

제 2 절. 고유전기진동

고유전기진동

진동회로에는 저항 R가 들어있으므로 전류의 세기의 진폭이 점차적으로 작아지다가 나중에는 령으로 된다. 즉 감쇠진동으로 된다. 회로의 저항이 작아질수록 전기진동은 더 천천히 감쇠될것이며 저항이 령으로 된다면 자유전기진동은 감쇠되지 않고 끊임없이 계속될것이다.

이처럼 축전기와 선륜으로만 이루어진 회로에서 끊임없이 계속되는 자유전기진동을 **고유전기진동**이라고 부른다.(그림 8-4)

고유전기진동에서의 진동수, 각진동수, 주기를 고유전기진동의 **고유주파수**, **고유각주파수**, **고유주기**라고 부른다.

※ 진동수를 **주파수**라고 부르기도 한다. 특히 전기진동에서는 진동수라는 말보다 주파수라는 말을 더 자주 쓴다.

리상적인 고유전기진동은 없으며 R가 대단히 작아서 령에 가까우면 그 전기진동을 고유전기진동이라고 볼수 있다.

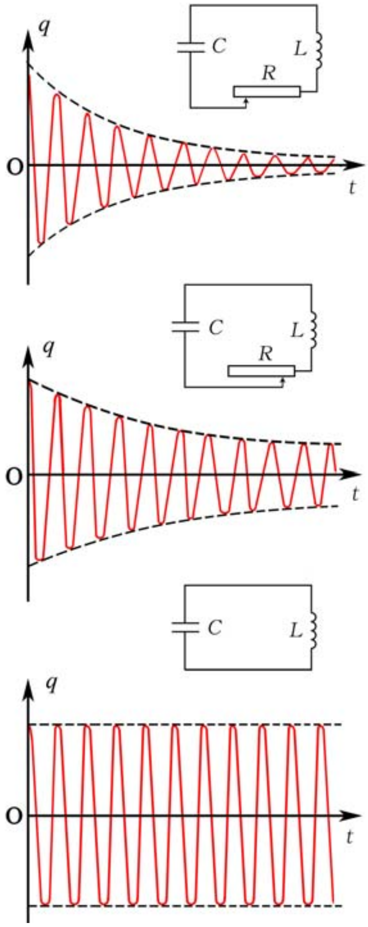


그림 8-4. 고유전기진동

전기진동의 에네르기

고유전기진동이 일어나는 진동회로에서 진동에네르기를 구해보자.

진동회로의 진동에네르기는 전기용량이 C인 축전기가 전기량 q로 충전되였을 때 두 극판사이에 생기는 전기마당의 에네르기 $W_{전}=q^2/2C$와 유도결수가 L인 선륜에 i의 전류가 흐를 때 선륜주위에 생기는 자기마당의 에네르기 $W_{자}=\mathrm{L}i^2/2$의 합으로 표시된다. 즉

$$W=W_{전}+W_{자}$$

각주파수 ω로 고유진동이 진행되는 진동회로에서 축전기가 전기량 q_0으로 충전되였다가 방전되기 시작하는 시각을 t=0으로 하면 전기량은 진동식

$$q=q_0\cos\omega t \tag{1}$$

으로 조화진동을 한다. 이처럼 축전기에 쌓이는 전기량 q가 조화진동하면 회로에 흐르는 방전전류 i는 전기량의 변화속도와 같으므로

$$i=-\frac{\Delta q}{\Delta t}=q_0\omega\sin\omega t \qquad (2)$$

로 된다. 여기서 －는 전기량의 변화와 반대라는것을 의미한다.

※ $\Delta q=q_0\{\cos\omega(t+\Delta t)-\cos\omega t\}=q_0\{\cos\omega t\cdot\cos\omega\Delta t-\sin\omega t\cdot\sin\omega\Delta t-\cos\omega t\}$이며 Δt가 매우 작을 때 $\cos\omega\Delta t=1$, $\sin\omega\Delta t=\omega\Delta t$ 이므로 $\frac{\Delta q}{\Delta t}=-q_0\omega\sin\omega t$ 로 볼수 있다.

이처럼 고유전기진동이 일어날 때 축전기에 쌓이는 전기량 q 와 선륜으로 흐르는 전류 i는 꼭같은 각주파수 ω로 진동한다.(그림 8-5의 ㄱ)

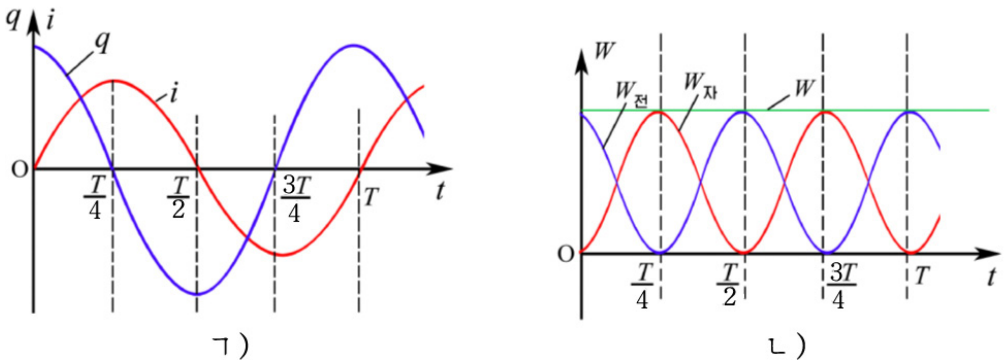


그림 8-5. 고유전기진동에서 전기량과 전류 및 에네르기의 변화

식 1, 2를 고려하면 전기진동이 일어날 때 전기마당의 에네르기와 자기마당의 에네르기는 다음과 같다.

$$W_{전}=\frac{1}{2}\frac{q^2}{C}=\frac{q_0^2}{2C}\cos^2\omega t=\frac{q_0^2}{4C}(1+\cos 2\omega t) \qquad (3)$$

$$W_{자}=\frac{1}{2}Li^2=\frac{1}{2}Lq_0^2\omega^2\sin^2\omega t=\frac{1}{4}Lq_0^2\omega^2(1-\cos 2\omega t) \qquad (4)$$

※ $1+\cos\omega t=2\cos^2\frac{\omega t}{2}$ 이다.

즉 고유전기진동이 일어날 때 전기마당의 에네르기와 자기마당의 에네르기는 주기적으로 변하면서 서로 전환된다.(그림 8-5의 ㄴ)

그림에서 보는바와 같이 전기마당의 에네르기와 자기마당의 에네르기의 최대값은 서로 같으며 임의의 시각에 고유전기진동의 에네르기는 일정하다.

$$W=\frac{1}{2}\cdot\frac{q_0^2}{C}=\frac{1}{2}Lq_0^2\omega^2 \quad \text{전기진동의 에네르기} \qquad (5)$$

진동회로의 고유주기

전기진동과정은 전기량이 축전기에 충전되였다가 선륜을 통하여 방전되는 과정의 반복이다. 축전기의 전기용량 C가 크면 극판에 전기량이 쌓이는 시간이 길어지고 선륜의 유도결수 L이 크면 큰 유도전동력이 생기므로 전류가 천천히 흐를것이다.

즉 진동회로의 고유주기는 전기용량 C가 클수록, 유도결수 L이 클수록 길어진다.

식 5로부터 전기용량이 C이고 유도결수가 L인 진동회로의 고유각주파수는 $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$과 같다. 그러므로 진동회로의 고유주기는 다음과 같이 결정된다.

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$ **진동회로의 고유주기**

진동회로의 고유주기는 유도결수 L과 전기용량 C를 곱한 값의 1/2제곱에 비례한다.

고유전기진동의 주파수가 작은 전기진동을 **저주파진동**, 주파수가 큰 전기진동을 **고주파진동**이라고 부른다.

자료 전기진동과 용수철진동의 비교

력학적진동은 직접 눈으로 볼수 있으나 전기진동과정은 눈으로 직접 볼수 없다. 그러나 이 두 진동에서 물리적량들과 진동과정을 비교해볼수 있다.

구 분 / 비 교	용수철진동	전기진동
물리적량	변위 x	전기량 q
	속도 v	전류의 세기 i
	질량 m	자체유도결수 L
	튐성결수 k	전기용량의 거꿀수 $\frac{1}{C}$
진동원인	튐힘 $F=kx$	전위차 $U=\frac{1}{C}q$
에네르기 전환	$\frac{1}{2}kx^2 \leftrightarrow \frac{1}{2}mv^2$ 자리에네르기 운동에네르기	$\frac{1}{2}\cdot\frac{q^2}{C} \leftrightarrow \frac{1}{2}Li^2$ 전기마당 에네르기 자기마당 에네르기



[례제] 전기용량이 400pF이고 유도결수가 100μH인 진동회로의 고유주파수와 고유주기를 구하여라.

풀이. 주어진것: C=400pF

L=100μH

구하는것: ν_0?, T?

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\times3.14\sqrt{100\times10^{-6}\times400\times10^{-12}}} \approx 7.9\times10^5\ \text{(Hz)}$$

$$T = \frac{1}{\nu_0} = 2\pi\sqrt{LC} = 2\times3.14\times\sqrt{100\times10^{-6}\times400\times10^{-12}} \approx 1.256\times10^{-6}\ \text{(s)}$$

답. 약 790kHz, 약 1.26×10^{-6}s

문 제

1. 다음의 문장이 옳은가?
   ㄱ) 고유진동회로에서 진동에네르기는 주기적으로 변한다.
   ㄴ) 진동에네르기는 전기마당의 에네르기, 자기마당의 에네르기의 최대값들을 합한 것의 절반과 같다.
   ㄷ) 진동회로에서 전기량이 한번 진동할 때 전기마당의 에네르기와 자기마당의 에네르기는 한번 진동하며 따라서 진동에네르기는 두번 진동한다.
   ㄹ) 진동회로에 저항이 없으면 진동에네르기는 계속 커진다.
2. 전기용량이 150pF이고 유도결수가 300μH인 진동회로의 축전기에 24V의 전압을 걸어주어 진동시킬 때 고유진동주기와 진동에네르기는 얼마인가?
3. 전기용량이 150pF인 축전기와 유도결수가 0.4mH인 선륜으로 진동회로를 만들고 축전기를 12V로 충전시킨 다음 스위치를 닫았다.
   ㄱ) 전기진동의 주기와 진동수는 얼마인가?
   ㄴ) 스위치를 닫은 때로부터 전류가 최대로 되는 순간까지 얼마의 시간이 걸리는가?
   ㄷ) 전류의 최대값은 얼마인가?

제 3 절. 유효저항과 유도저항

교류회로에는 저항, 축전기, 선륜과 같은 전자요소들이 들어있다. 이러한 전자요소들이 교류회로에서 어떤 작용을 하겠는가를 보자.

유효저항

저항 R가 들어있는 전기회로에 교류전압을 걸면 저항 R는 어떤 작용을 하겠는가.

실 험

그림 8-6에서 스위치를 A쪽에 넣었을 때와 B쪽에 옮겼을 때 전등의 밝기를 비교한다. B쪽에 련결하였을 때 전등의 밝기가 어둡다.

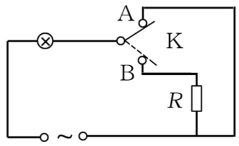


그림 8-6. 교류에 대한 도체의 저항

여기로부터 무엇을 알수 있는가.

교류전원에 이은 저항 R는 직류회로에서와 마찬가지로 교류전류의 흐름을 방해한다는것을 알수 있다. 이처럼 교류에 대한 도체의 저항을 **유효저항**이라고 부른다.

즉 유효저항 R에 교류전압 $u_R = u_{0R} \sin \omega t$가 걸리면 옴의 법칙에 따라

$$i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{u_{0R}}{R} \sin \omega t = i_{0R} \sin \omega t \qquad (1)$$

로 표시되는 교류전류가 흐른다.(그림 8-7)

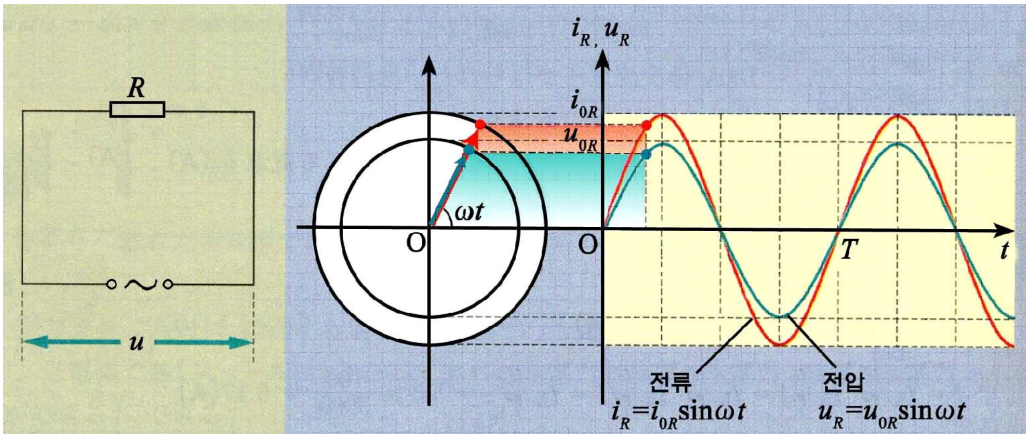


그림 8-7. 유효저항에서 전압과 전류의 자리각은 같다

이처럼 유효저항에서 전류의 자리각은 전압의 자리각과 같다.

유효저항에서 교류전압과 전류의 진폭 및 실효값들사이에는 다음의 관계가 있다.

$u_{0R} = i_{0R} R$	유효저항에서 전압과 전류의 진폭사이의 관계	(2)
$U_R = I_R R$	유효저항에서 전압과 전류의 실효값들사이의 관계	

유도저항

선륜이 들어있는 회로에 교류전압이 걸리면 선륜은 어떤 작용을 하겠는가.

실험

그림 8-8과 같이 선륜과 전등을 직렬련결한 회로에 직류전압을 걸었을 때와 교류전압을 걸었을 때 전등불의 밝기를 비교한다.

교류전압을 걸었을 때 밝기가 어둡다.

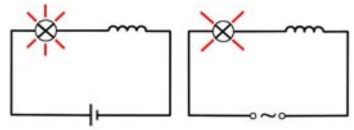


그림 8-8. 교류전압을 걸었을 때 전등의 밝기가 어둡다

이로부터 무엇을 알수 있는가.

선륜이 교류에 대하여서는 저항을 가진다는것을 알수 있다.

그것은 선륜에 교류가 흐를 때 전류변화를 막는 자체유도전동력이 생기기때문이다.

이처럼 선륜이 교류에 대하여 나타내는 저항을 **유도저항**이라고 부른다.

그러면 유도저항의 크기가 무엇에 관계되며 유도저항만 있는 교류회로에서 전압과 전류사이에는 어떤 관계가 있는가.

실험

○ 그림 8-8과 같은 회로에서 꼭같은 선륜을 직렬로 련결한 회로에 교류전압을 걸었을 때 전등의 밝기를 처음과 비교한다. 어두워진다.

○ 우의 실험에서 선륜에 철심을 넣고 밝기를 비교한다. 더 어두워진다.

○ 교류전원을 저주파전원으로 바꾸고 주파수를 변화시키면서 전등의 밝기변화를 살핀다. 주파수가 높을수록 더 어두워진다.

실험을 통하여 무엇을 알수 있는가.

선륜의 유도결수 L이 클수록, 교류의 주파수가 높을수록 교류전류는 잘 흐르지 못한다는것을 알수 있다. 그것은 유도결수 L이 크면 큰 자체유도전동력($\mathcal{E} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$)이 생기기때문이며 주파수 ν가 클수록 전류변화속도가 커져서 자체유도전동력이 커지기때문이다. 그림 8-9와 같은 회로에서 각주파수가 ω인 교류전압이 선륜에 걸려 교류전류 $i_L = i_{0L}\sin\omega t$가 흐른다고 하자.

참고 유효저항과 옴저항

도체의 유효저항은 주파수에 따라 조금씩 달라진다. 교류의 주파수가 크면 표피효과에 의해 전류가 흐르는 자름면이 작아지므로 유효저항이 커지고 교류의 주파수가 작으면 유효저항은 옴저항과 같다.

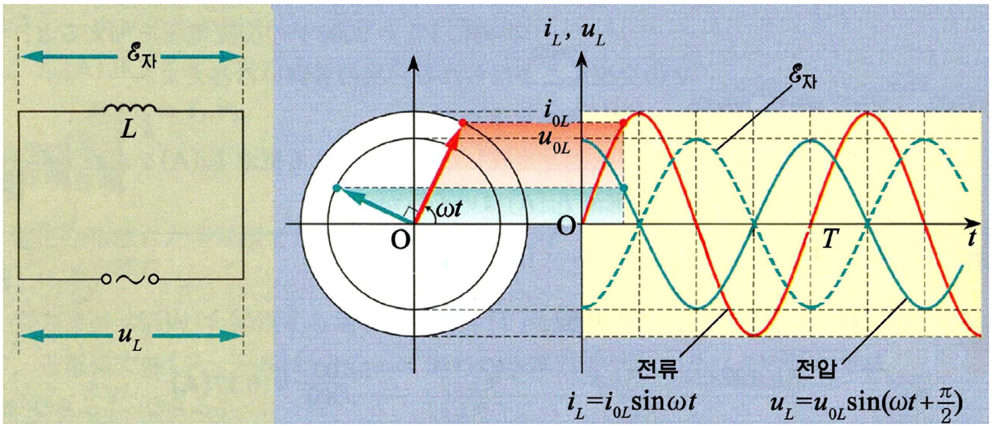


그림 8-9. 선륜에서 교류전압은 전류보다 자리각이 $\pi/2$만큼 앞선다

선륜을 만든 도선의 저항이 작아서 무시된다면(R=0) 키르호호프의 제2법칙으로부터 선륜에 생긴 자체유도전동력 $\mathscr{E}_{자}=-L\dfrac{\Delta i}{\Delta t}$는 선륜에 걸린 전압과 비기므로 전압 u_L는 다음과 같이 표시된다.

$$u_L=-\mathscr{E}_{자}=L\frac{\Delta i}{\Delta t}=\omega Li_{0L}\cos\omega t=u_{0L}\sin(\omega t+\frac{\pi}{2}) \qquad (3)$$

이처럼 선륜에서 교류전압은 교류전류보다 $\pi/2$만큼 앞서는 자리각을 가진다.

유도저항에서 교류전압과 전류의 진폭 및 실효값들사이에는 다음의 관계가 선다.

$u_{0L}=i_{0L}L\omega$ **유도저항에서 전압과 전류의 진폭들사이의 관계**

$U_L=I_LL\omega$ **유도저항에서 전압과 전류의 실효값들사이의 관계** (4)

옴의 법칙 $I=\dfrac{U}{R}$와 비교하면 식 4로부터 선륜의 유도저항은 다음과 같다.

$X_L=\omega L=2\pi\nu L$ **유도저항**

유도저항은 선륜의 유도결수가 클수록, 교류의 주파수가 높을수록 크다.

그러므로 직류는 선륜을 잘 통과하지만 교류는 잘 통과 못하며 주파수가 높은 교류일수록 유도저항은 더 커진다.

[례제] 유도저항이 30Ω인 선륜에 I=0.2A의 교류전류가 흐른다. 선륜에 걸린 전압의 실효값과 진폭은 얼마인가?

풀이. 주어진것: X_L=30Ω

I=0.2A

구하는것: U?, u_0?

$$U=IX_L=0.2\text{A}\times30\Omega=6\text{V}$$

$$u_0=\sqrt{2}U=8.4\text{V}$$

답. 6V, 8.4V

문제

1. 다음의 문장에서 옳은것을 찾고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 선륜에 직류전압을 걸면 선륜은 유효저항만을 가진다.
   ㄴ) 선륜은 직류에 대해서는 유도저항을 가지지 않는다.
   ㄷ) 교류회로에서 권회수가 작은 선륜은 유도저항도 작다.
   ㄹ) 선륜에 60Hz, 220V의 교류전압을 걸었을 때 유도저항은 60Hz, 22V의 교류전압을 걸었을 때보다 10배 크다.
   ㅁ) 선륜에 직류전류가 흐르는 전기간 유도저항은 언제나 령이다.
2. 유도저항의 단위가 1Ω이라는것을 밝혀라.
3. 어떤 선륜에 주파수가 300MHz인 교류가 흐를 때 생기는 유도저항은 주파수가 60Hz인 교류가 흐를 때보다 몇배나 더 큰가?

제 4 절. 용량저항과 무효저항

용량저항

축전기가 들어있는 전기회로에 전류가 흐를수 있겠는가.

실험

○ 그림 8-10과 같이 축전기와 전등을 직렬로 이은 회로에 직류전압을 걸어주고 전등의 밝기를 관찰한다. 짧은 순간 불이 켜진다.

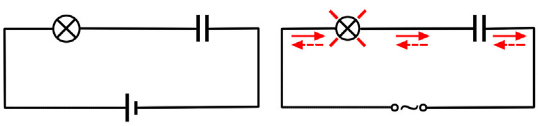


그림 8-10. 축전기로 흐르는 교류

○ 다음 그 회로에 교류전압을 걸어주고 전등의 밝기를 관찰한다. 전등불이 켜져있다.

이로부터 무엇을 알수 있는가.

직류는 축전기로 흐르지 않지만(다만 충전과 방전때에만 흐른다.) 교류는 축전기로 잘 흐른다.

축전기로 교류가 어떻게 흐르는가.

축전기를 교류전원에 이으면 전압이 높아지는 동안은 전기줄로 전류가 흐르면서 극판들이 충전되고 전압이 낮아지는 동안은 방전되면서 반대방향의 전류가 전기줄로 흐른다.

이처럼 축전기의 극판사이로 전기량들이 옮겨가는것이 아니라 충방전이 엇바뀌는 과정에 회로에 전류가 흐른다.

그러면 교류회로에서 축전기는 어떤 작용을 하겠는가.

실험

○ 그림 8-11과 같이 스위치 K를 B쪽에 넣어 교류전원에 전등과 축전기를 직렬로 련결하였을 때 전등의 밝기를 관찰한다.

○ 스위치 K를 A쪽에 넣어 교류전원에 전등만 련결하였을 때 전등의 밝기를 처음과 비교한다. 축전기를 련결하면 전등불이 어둡다.

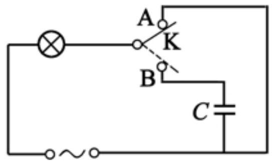


그림 8-11. 축전기의 용량저항을 알아보는 실험

이로부터 무엇을 알수 있는가.

축전기도 선륜과 마찬가지로 교류에 대하여 저항작용을 한다는것을 알수 있다.

이처럼 축전기가 교류에 대하여 가지는 저항을 **용량저항**이라고 부른다.

용량저항의 크기가 무엇에 관계되며 용량저항만 있는 교류회로에서 전압과 전류사이에는 어떤 관계가 있는가.

실험

○ 그림 8-11과 같은 회로에 같은 축전기를 병렬로 더 련결하고 전등의 밝기를 살핀다. 축전기의 전기용량이 클수록 전등불이 더 밝다.

○ 교류전원을 저주파전원으로 바꾸고 주파수를 변화시키면서 전등의 밝기를 살핀다. 주파수가 높을수록 전등불이 더 밝다.

실험은 무엇을 보여주는가.

축전기의 전기용량 C가 클수록, 교류의 주파수가 높을수록 전류가 더 잘 흐른다는것을 보여준다. 그것은 축전기의 전기용량이 클수록 축전기에 쌓이는 전기량이 많아지고 주파수가 높을수록 단위시간동안에 전기줄로 오고가는 전기량이 더 많아지기때문이다.

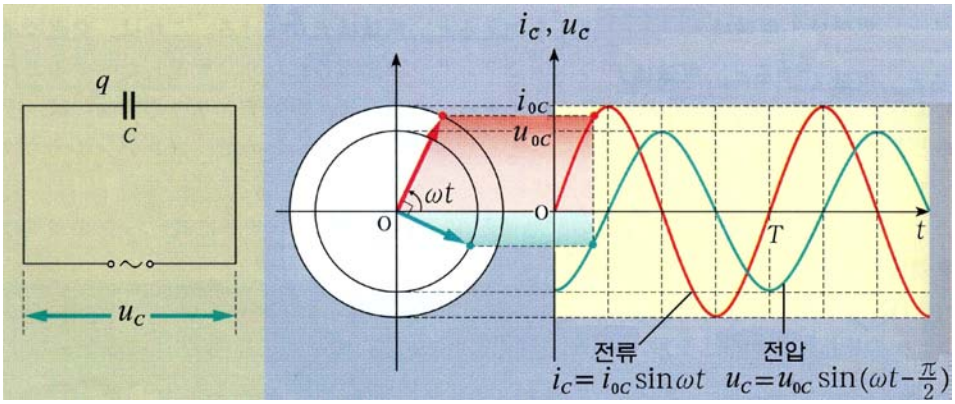


그림 8-12. 축전기에서 전압은 전류보다 자리각이 $\pi/2$ 만큼 떨어진다

그림 8-12에서 전기용량이 C인 축전기에 걸린 교류전압이 $u_C = u_{0C}\sin\omega t$와 같이 주기적으로 변한다.

이로부터 회로에 흐르는 전류의 세기는 다음과 같다.

$$i_C = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C\frac{\Delta u_C}{\Delta t} = C\omega u_{0C}\cos\omega t = i_{0C}\sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \qquad (1)$$

즉 <u>축전기에서 교류전류는 교류전압보다 자리각이 $\pi/2$만큼 앞선다.</u>

여기서 축전기에 걸린 교류전압과 전류의 진폭 및 실효값들사이에는 다음의 관계가 있다.

$$u_{0C} = i_{0C}\frac{1}{C\omega}$$ **축전기에서 전압과 전류의 진폭들사이의 관계**

$$U_C = I_C\frac{1}{C\omega}$$ **축전기에서 전압과 전류의 실효값들사이의 관계** (2)

옴의 법칙과 비교하면 식 2로부터 축전기의 용량저항은 다음과 같다.

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi\nu C}$$ **축전기의 용량저항**

<u>용량저항은 전기용량이 클수록, 주파수가 높을수록 작다.</u>

이처럼 축전기로는 교류만 흐를수 있으며 주파수가 높을수록 더 잘 흐른다.

무효저항

교류회로에는 직류회로와 달리 유효저항뿐아니라 유도저항과 용량저항도 들어있다.

유효저항은 직류회로의 옴저항과 마찬가지로 회로에 흐르는 교류전류의 세기를 제한하면서 쥴열을 발생하므로 전원으로부터 받은 에네르기를 소비한다.

그러나 유도저항과 용량저항은 회로에 흐르는 교류전류의 세기를 제한하지만 쥴열을 발생시키지 않는다. 다만 전원으로부터 받은 에네르기를 전기마당의 에네르기 혹은 자기마당의 에네르기로 저축하였다가 전원에 되돌려보낼뿐이다.

이러한 의미에서 교류회로에서는 유도저항과 용량저항을 통털어 **무효저항**이라고 부른다. 유도저항을 **유도성무효저항**, 용량저항을 **용량성무효저항**이라고도 부른다.

교류회로에서 무효저항의 크기는 유도저항과 용량저항의 차와 같다. 즉

$$X = |X_L - X_C| = \left|\omega L - \frac{1}{\omega C}\right|$$



두개의 고성기(저음용, 고음용)와 유도저항, 용량저항 각각 1개를 리용하여 저음과 고음이 따로 울리도록 하려면 어떻게 해야 하는가?
원리적인 회로를 그려보아라.

[례제] 전기용량이 10μF인 축전기가 전압이 220V이고 주파수가 60Hz인 전원에 련결되였다. 전류의 실효값과 최대값을 구하여라.

풀이. 주어진것: C=10μF

U=220V

ν=60Hz

구하는것: I?, i_0?

$$I=\frac{U}{Xc}=U\omega C=U\cdot 2\pi\nu C=220\times 2\pi\times 60\times 10\times 10^{-6}=0.84\,(A)$$

$$i_0=\sqrt{2}I=1.41\times 0.84=1.18\,(A)$$

답. 0.84A, 1.18A

문 제

1. 다음의 □안에 알맞는 말을 써넣어라.
   축전기와 □을 병렬로 잇고 직류와 고주파교류가 함께 흐르게 할 때 □는 축전기로 잘 흐르고 □는 선륜으로 잘 흐른다. 그것은 □에 대한 축전기의 □이 작고 선륜의 □이 크며 □에 대한 축전기의 □이 크고 선륜의 □은 령이기때문이다.
2. 축전기의 용량저항의 단위가 1Ω과 같다는것을 밝혀라.
3. 전동력이 12V인 전지와 전기용량이 $C_1=1\mu$F 및 $C_2=3\mu$F 인 축전기와 유도결수가 L=5mH인 선륜을 그림 8-13과 같이 련결하였다. S_1, S_2, S_3은 스위치이다.
   ㄱ) 처음 S_1를 닫고 C_1를 충전한 후 S_1를 열고 다음 S_2을 닫았다. 이때 C_1의 극판사이의 전압은 얼마인가?
   ㄴ) 이제 S_3까지 닫으면 전기진동이 일어나는데 이때의 주파수와 S_2을 연 다음의 전기진동주파수와의 비는 얼마인가?

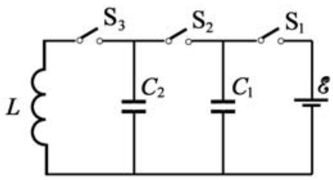


그림 8-13

제 5 절. 교류회로의 옴의 법칙

교류의 기본특성은 축전기 C와 선륜 L가 들어있는 회로에서 뚜렷이 나타나며 직류회로와 교류회로의 차이도 이 회로에 의하여 밝혀진다.

그러면 유효저항 R와 축전기 C 및 선륜 L가 들어있는 회로에서 교류전류와 전압사이의 관계를 구체적으로 보자.

*R, L, C*직렬회로에 흐르는 전류

교류회로는 일반적으로 유효저항 R, 선륜 L, 축전기 C를 가지며 이 요소들에서 전류와 전압은 일정한 자리각차를 가진다.

R, L, C를 직렬로 련결하고 각주파수가 ω(주파수 $\nu=\omega/2\pi$)인 교류전압을 걸어주면 직렬회로의 각 부분에는 전원전압과 같은 주파수의 교류전류가 흐른다.(그림 8-14)

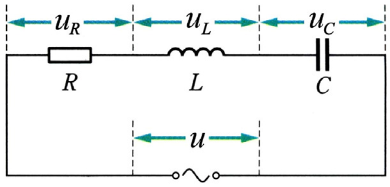


그림 8-14. R, L, C 직렬회로

이 전류를 $i=i_0\sin\omega t$ 로 표시하면 R, L, C에 걸리는 전압 u_R, u_L, u_C 들은 진폭과 자리각이 서로 차이난다.(그림 8-15)

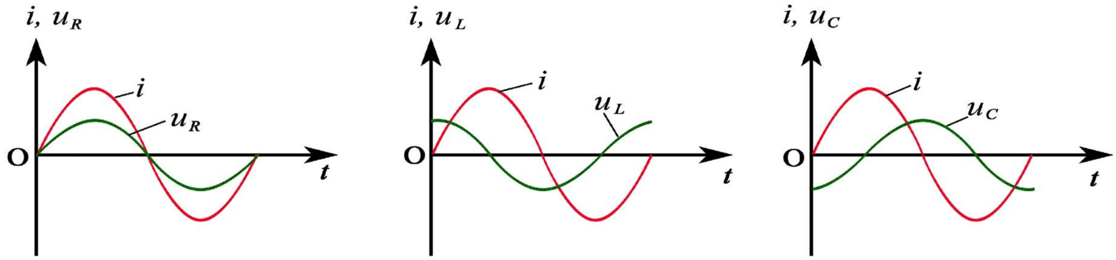


그림 8-15. 유효저항, 유도저항, 용량저항에서 전류와 전압의 자리각차

유효저항에서는 전류와 전압의 자리각이 같고 선륜에서는 전류보다 전압의 자리각이 $\pi/2$만큼 앞서며 축전기에서는 $\pi/2$만큼 뒤떨어진다.

매 부분에 걸리는 전압들의 진폭이 $u_{0R}=Ri_0$, $u_{0L}=\omega Li_0$, $u_{0C}=\dfrac{1}{\omega C}i_0$ 으로 되므로 R, L, C에 걸리는 전압은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$u_R=u_{0R}\sin\omega t$$
$$u_L=u_{0L}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)=\omega Li_0\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$
$$u_C=u_{0C}\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)=\frac{1}{\omega C}i_0\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)$$

이때 전원전압은 이 전압들의 합으로 표시할 수 있다. 즉

$$\vec{u}=\vec{u}_R+\vec{u}_L+\vec{u}_C$$

자리각이 차이나는 전압들의 합은 벡토르합성법을 리용하여 계산할수 있다.

R, L, C에 걸리는 전압들의 진폭벡토르들을 $\vec{u}_{0R}$, $\vec{u}_{0L}$, $\vec{u}_{0C}$ 으로 표시하고 회로에 흐르는 전류의 진폭벡토르의 자리각을 기준으로 하여 전압진폭벡토르들을 표시하면 그림 8-16의 ㄱ와 같다.

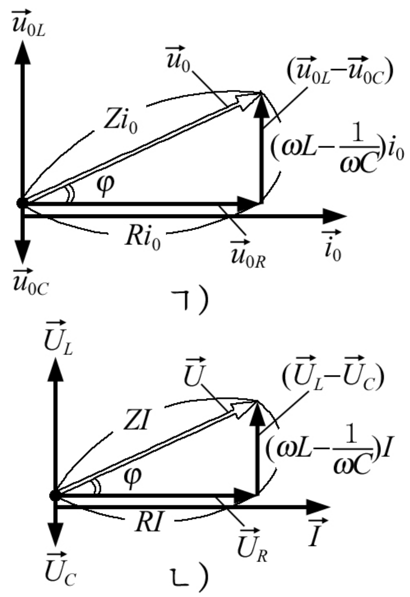


그림 8-16. 매 부분에 걸린 전압들의 진폭벡토르(전압3각형)

전압진폭벡토르들을 벡토르합성하면 교류회로에 걸린 전체 전압의 진폭벡토르의 크기는 다음과 같이 계산된다. 즉

$$u_0^2 = u_{0R}^2 + (u_{0L} - u_{0C})^2 = i_0^2\left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2\right]$$

따라서

$$u_0 = i_0\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

여기로부터

$$i_0 = \frac{u_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \qquad (1)$$

R, L, C가 직렬련결된 회로에서 식 1에 의하여

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \text{완전저항} \qquad (2)$$

는 직류회로에서의 옴의 법칙에서 옴저항처럼 표시되는 량으로서 **완전저항**이라고 부른다.

완전저항 Z는 유효저항 R와 무효저항 X로 표시된다.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

R, L, C에 각각 걸리는 교류전압의 실효값들을 U_R, U_L, U_C 로 표시하면 전체 전압과 전류의 세기의 실효값들은 U와 I로 표시된다.(그림 8-16의 ㄴ)

그러므로 식 1은

$$I = \frac{U}{Z} \quad \text{교류회로의 옴의 법칙} \qquad (3)$$

으로 된다.

즉 <u>교류회로에서 전류의 세기는 전압에 비례한다.</u> 이것을 **교류회로의 옴의 법칙**이라고 부른다.

※ 교류회로의 측정과 계산에서는 최대값(진폭)보다 실효값을 더 많이 쓴다.

*R, L, C*직렬회로에서 전류와 전압의 자리각차

R, L, C가 직렬로 련결된 회로에서 회로에 흐르는 전류와 매 부분에 걸리는 전압은 일정한 자리각차를 가지므로 회로에 흐르는 전류와 전체 전압은 φ만 한 자리각차를 가진다.(그림 8-17)

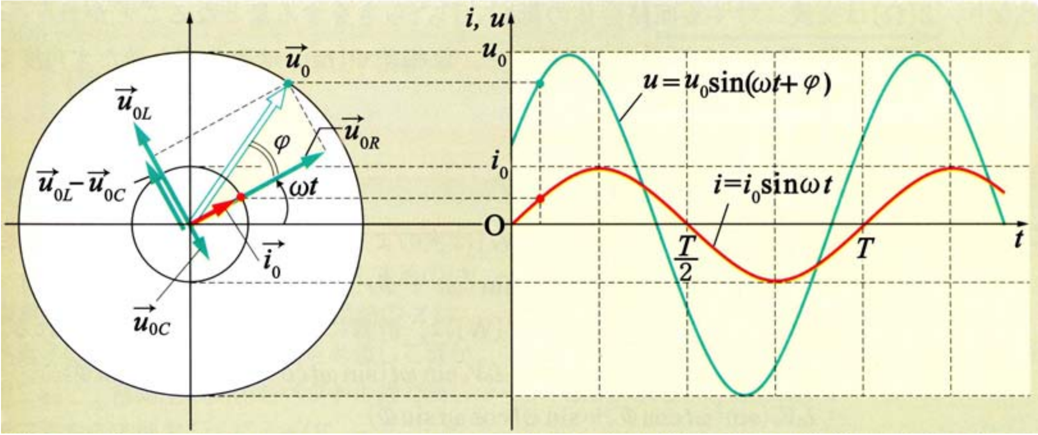


그림 8-17. ***R*, *L*, *C***직렬회로에 흐르는 전류와 전압의 자리각차

즉 *R*, *L*, *C*가 직렬련결된 교류회로에서 회로에 흐르는 전류와 전체 전압은

$$i = i_0 \sin \omega t$$
$$u = u_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

로 표시된다.

교류회로에서 전압과 전류가 φ만 한 자리각차를 가지게 되는것은 무효저항때문이다.

그러므로 자리각차 φ의 tan값은 그림 8-16의 ㄴ로부터

$$\tan\varphi = \frac{U_X}{U_R} = \frac{I(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{IR} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \qquad (4)$$

만일 무효저항이 없으면($X=0$) 전류와 전압의 자리각은 일치한다.

즉 *R*, *L*, *C*가 들어있는 교류회로에서도 $\omega L = \dfrac{1}{\omega C}$이면 순수 유효저항만 들어있는 경우와 같게 된다.



R, *L*, *C*병렬회로에서 옴의 법칙이 어떻게 표시되겠는가?(그림 8-18) 병렬회로에서 매 부분에 걸리는 전압은 같다는것을 생각하여라.

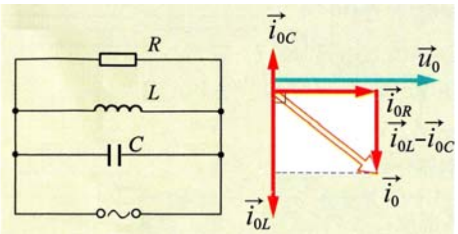


그림 8-18. 병렬회로에서 매 부분에 흐르는 전류들의 자리각차

문 제

1. 다음의 문장들에서 옳은것을 찾고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) R, L, C가 들어있는 회로에서 전류의 세기는 $I=U/R$로 계산될수 없다.
   ㄴ) R, L, C가 직렬련결된 회로에서 매 부분에 걸리는 전압은 회로전체에 걸린 전압보다 클수 있다.
   ㄷ) 무효저항이 있는 교류회로에서 전류와 전압의 자리각차는 령이 될수 있다.
   ㄹ) R, L, C를 직렬로 이은 교류회로에서 완전저항은 유효저항보다 언제나 크다.
2. L=2.5H, R=5Ω인 선륜과 C=4μF인 축전기를 직렬련결한 회로에 주파수가 50Hz인 5V의 교류전압이 걸린다. 이 회로에 흐르는 전류의 세기는 얼마인가?
3. 선륜에 10V의 직류전원을 이었을 때에는 10mA의 전류가, 60Hz, 10V의 교류전원을 이었을 때에는 5mA의 전류가 흐른다. 이 선륜의 유도결수를 구하여라.
4. 유효저항이 12.5Ω, 유도결수가 0.5mH, 전기용량이 10μF인 R, L, C직렬회로에 60Hz, 220V의 교류전압과 100kHz, 5V의 교류전압이 걸릴 때 회로의 완전저항, 회로에 흐르는 전류의 세기, 전압과 전류의 자리각차를 구하여라.

제6절. 전 기 공 진

강제전기진동

실제전기진동회로에서 선륜은 유효저항을 가지며 회로에는 배선 및 접촉저항이 있으므로 쥴열에 의한 에네르기손실이 반드시 있게 된다. 전기진동이 계속되자면 력학적진동과 마찬가지로 주기적으로 에네르기를 보충해주어야 한다.

전기진동회로에 교류전압을 걸어주었을 때 회로에 흐르는 전류의 주파수를 살펴보자.

실 험

○ 그림 8-19와 같은 진동회로에 교류전원을 련결하고 오씰로그라프를 리용하여 교류전원전압의 주파수와 회로에 흐르는 전류의 주파수를 비교해보아라. 전원전압의 주파수와 전류의 주파수가 같다.

○ 교류전원대신에 저주파발진기를 련결하고 발진주파수를 변화시키면서 회로에 흐르는 전류의 주파수와 비교해보자. 발진기의 발진주파수와 전류의 주파수는 같다.

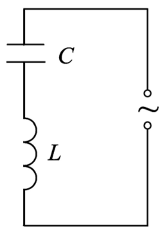


그림 8-19. 강제전기진동실험

실험으로부터 전기진동회로의 주파수는 회로에 걸어준 교류전원전압의 주파수에

따른다는것을 알수 있다.

전기진동회로에 걸어준 교류전압의 주파수와 같은 주파수로 일어나는 전기진동을 **강제전기진동**이라고 부른다.

이때 교류전압은 력학적진동에서의 강제힘과 같다.

전기기계나 기구들에 교류전류가 흐르는것도 강제전기진동으로 볼수 있다.

전기공진

강제전기진동에서도 력학적공진과 같은 현상이 나타나는가를 실험으로 알아보자.



○ 그림 8-20과 같이 축전기와 선륜으로 이루어진 전기진동회로를 전등을 거쳐 저주파전원에 련결한다.

○ 저주파전원의 주파수를 점차 높이면서 전등의 밝기를 살펴본다. 전등은 점점 밝아지다가 어떤 주파수에서 최대로 되고 다시 점점 어두워진다. 제일 밝아질 때 저주파전원의 주파수와 회로의 고유주파수를 비교한다.

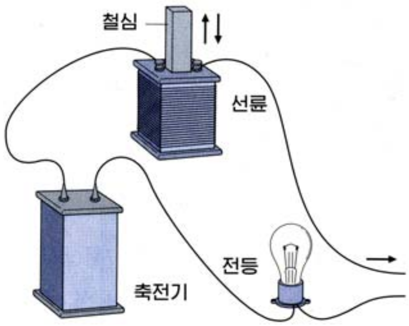


그림 8-20. 전기공진실험

○ 저주파전원의 주파수를 일정하게 고정하고 선륜에 철심을 넣어 유도결수를 변화시키면서 전등의 밝기를 살펴본다. 전등이 제일 밝을 때 회로의 고유주파수와 저주파전원의 주파수를 비교한다.

실험으로부터 저주파전원의 주파수와 전기진동회로의 고유주파수가 같아질 때 전류의 세기가 최대로 된다는것을 알수 있다.

이처럼 진동회로에 련결한 저주파전원의 주파수와 진동회로의 고유주파수가 같아질 때 전류의 세기가 최대로 되는 현상을 **전기공진**이라고 부른다.

전기공진현상을 구체적으로 알아보자.

진동회로에서 L과 C가 정해지면 회로의 고유각주파수는 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 로서 일정하다.

그러나 진동회로의 무효저항 X는 회로에 걸리는 교류전압의 각주파수 ω에 따라 달라진다.

만일 교류전압의 각주파수 ω와 진동회로의 고유각주파수 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 이 같다면 X=0으로 되며 진동회로의 완전저항은 $Z=R$로서 가장 작아져 회로에 센 교류

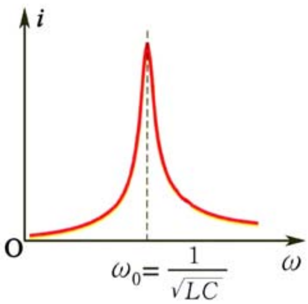


그림 8-21. 교류의 각주파수에 따르는 전류의 세기

전류가 흐른다. 이때 회로에 흐르는 전류는 $I = U/R$ 로서 회로의 유효저항이 작을수록 더 커진다.(그림 8-21)

따라서 진동회로의 공진각주파수는 다음과 같다.

$$\omega_{공} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad \textbf{전기공진조건}$$

전기공진이 일어날 때 전압과 전류는 같은자리각으로 진동하며 이때 흐르는 전류 i 가 최대이므로 선륜과 축전기에 걸리는 전압은 $u_{0L} = \omega L i_0 = \frac{i_0}{\omega C} = u_{0C}$ 로서 최대로 되며 외부전압보다 클수 있다.(그림 8-22)

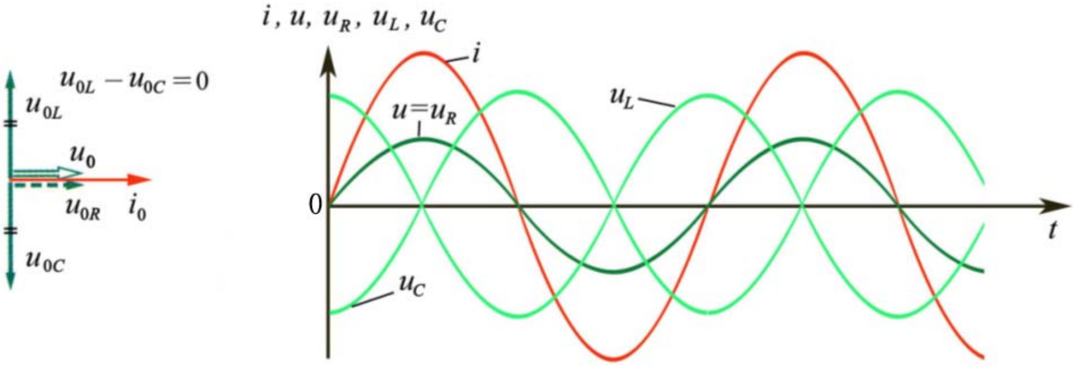


그림 8-22. 전기공진때 전압과 전류

전압공진과 전류공진

전기공진에는 전압공진과 전류공진이 있다.

전압공진은 선륜과 축전기가 직렬로 이어진 공진회로에서 일어나며 $\omega L = 1/\omega C$인 때 회로에 흐르는 전류의 세기가 최대값을 가진다. 전압공진은 필요한 신호를 증폭할 때 리용한다.

전류공진은 선륜과 축전기가 병렬로 이어진 공진회로에서 일어나며 이때 회로에 흐르는 전류의 세기가 최소값을 가진다.(그림 8-23) 전류공진은 회로에서 불필요한 신호를 제한할 때 쓰인다.

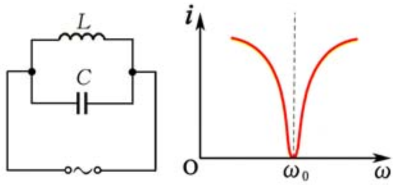


그림 8-23. 전류공진

전기공진의 리용

전기공진현상은 라지오나 TV의 수신에서 필요한 방송국의 신호를 선택하는데 리용한다. 진동회로에서 L과 C의 값을 조절하여 외부신호와 공진시키는것을 **동조**라

고 부르며 그 진동회로를 **동조회로**라고 부른다.

라지오수신기에서 그림 8-24와 같은 동조회로로 입구회로를 만들어 들으려는 방송국의 신호를 선택한다.

여러 방송국에서 오는 수많은 방송신호들가운데서 들으려는 방송신호를 고르려면 진동회로의 가변축전기의 전기용량 C를 변화시켜 진동회로의 고유주파수와 들으려는 방송국의 신호주파수를 일치시켜 수신회로에 센 전류가 흐르도록 한다.

이때 L과 C에 걸리는 전압이 최대로 된다.

전기공진회로를 **공진기** 또는 **공진자**라고도 부른다.

새로운 재료를 리용한 공진기들이 수많이 개발리용되고있다.

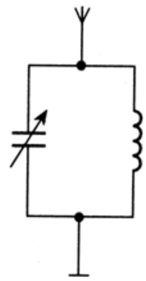


그림 8-24. 라지오 수신기의 입구회로

[례제] L=160μH인 수신회로로 v=785kHz인 신호를 수신하려면 축전기의 전기용량을 얼마로 해야 하는가?

풀이. 주어진것: L=160μH

v=785kHz

구하는것: C?

$$v=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$ 로부터

$$C=\frac{1}{4\pi^2v^2L}=\frac{1}{4\times3.14^2\times\left(785\times10^3\right)^2\times160\times10^{-6}}\approx257(\text{pF})$$

답. 약 257pF

문제

1. 다음의 문장에서 틀린것을 지적하여라.
   ㄱ) 전기공진이 일어날 때 완전저항은 령이다.
   ㄴ) 전기공진이 일어날 때 무효저항은 령이다.
   ㄷ) 전기공진이 일어날 때 유효저항은 령이다.
   ㄹ) 회로에 유효저항이 언제나 존재하므로 전기공진은 일어날수 있다.
2. L=0.1mH, R=5Ω인 선륜, C=411pF인 축전기로 직렬련결된 진동회로에 5V의 교류전압이 걸린다.
   ㄱ) 교류주파수가 얼마일 때 전기공진이 일어나겠는가?
   ㄴ) 전기공진이 일어날 때 전류의 세기, 선륜과 축전기에 걸린 전압을 구하여라.
3. L=160μH, C=250pF인 전기진동회로에서 전기공진을 일으키려면 강제전기진동의 주파수를 얼마로 해야 하는가? 또 여기에 꼭같은 축전기를 병렬로 이을 때의 강제전기진동의 주파수는 얼마인가?

제7절. 교류의 전력

위대한 수령 **김일성**대원수님께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리 나라 인민경제의 어느 부문을 막론하고 전기를 쓰지 않는데는 하나도 없습니다.》

인민경제 여러 부문과 가정, 학교에 이르기까지 우리 나라에서 쓰는 전류는 주파수가 60Hz인 교류전류이다.

전기회로에 흐르는 교류는 전압과 전류가 시시각각으로 변하기때문에 교류의 전력은 직류에서처럼 간단히 구할수 없다.

무효전력

무효저항 X만 들어있는 교류회로에서의 전력은 얼마인가를 알아보자.

유도저항에서 전력. 유도결수가 L인 선륜에 각주파수가 ω인 교류전압이 걸렸다고 하자.

이때 회로에 흐르는 교류전류를 $i = i_0 \sin\omega t$로 표시하면 선륜에 걸린 전압은

$$u_L = u_{0L}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

로 된다. 그러므로 유도저항에서 t시각의 전력은 다음과 같다.

$$P_L = u_L i = u_{0L} i_0 \sin\omega t \cdot \cos\omega t = u_{0L} i_0 \frac{1}{2}\sin 2\omega t = U_L I \sin 2\omega t \qquad (1)$$

※ $\sin\omega t \cdot \cos\omega t = \frac{1}{2}\sin 2\omega t$ 이다.

식 1에서 보는것처럼 유도저항에서 교류의 전력은 교류각주파수의 2배 되는 각주파수로 변화된다.

그림 8-25에서 보는바와 같이 전류가 증가하는 $T/4$동안은 i와 u_L의 부호가 같아서 P_L가 +로 되는데 이때 전원으로부터 공급되는 전력량이 선륜의 자기마당의 에네르기로 축적된다.

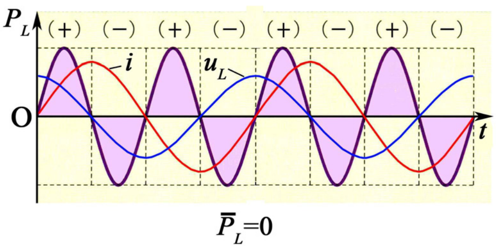


그림 8-25. 유도저항에서의 전력

그리고 전류가 감소하는 $T/4$동안은 i와 u_L의 부호가 반대이므로 P_L가 −로 되는데 이때 자기마당의 에네르기가 전원으로 되돌아간다.

이처럼 전원과 선륜사이에서 에네르기가 오고갈뿐 전력은 소비되지 않는다.($\overline{P}_L = 0$)

용량저항에서 전력. 전기용량이 C인 축전기의 극판사이에 각주파수가 ω인 교류전압이 걸렸다고 하자. 이때에는 전압이 $u_C = u_{0C}\sin(\omega t - \pi/2)$로서 전류 $i = i_0 \sin\omega t$보다 자리각이 $\pi/2$만큼 뒤떨어진다.

따라서 용량저항에서 t시각의 전력은

$$P_C = u_C i = -U_C I \sin 2\omega t \qquad (2)$$

즉 용량저항에서 교류의 전력도 유도저항에서와 마찬가지로 교류각주파수의 2배 되는 각주파수로 변화된다.

그림 8-26에서 보는것처럼 전압이 증가하는 $T/4$동안은 전원으로부터 공급된 전력량이 축전기에 전기마당의 에네르기로 축적된다.

그리고 전압이 감소하는 $T/4$동안은 축적되였던 전기마당의 에네르기가 전원으로 되돌아간다.

이처럼 전원과 축전기사이에서 에네르기가 오고갈뿐 전력은 소비되지 않는다. ($\overline{P}_C = 0$)

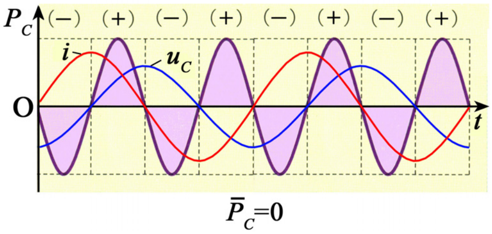


그림 8-26. 용량저항에서의 전력

선륜과 축전기가 함께 들어있는 교류회로에서의 전력은 식 1과 식 2의 합으로 표시되며 한주기평균하면 전력은 령과 같다.

이처럼 무효저항에서는 전력이 소비되지 않고 전원과 무효저항사이에서 에네르기가 오고갈뿐이다. (그림 8-27) 이런 의미에서 무효저항에서의 전력을 **무효전력**이라고 부른다.

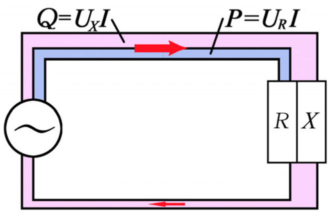


그림 8-27. 무효전력

교류회로에서의 전력

유효저항 R와 무효저항 X가 포함되여있는 교류회로에서 전력은 어떻게 되겠는가. (그림 8-28의 ㄱ)

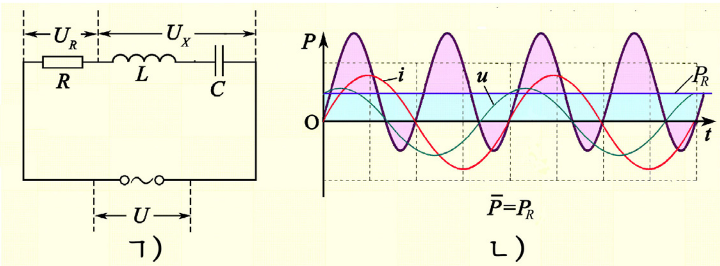


그림 8-28. 교류회로에서 전력

교류회로에 각주파수가 ω인 교류전압이 걸려 $i=i_0\sin\omega t$와 같은 교류전류가 흐르면 전압은 $u=u_0\sin(\omega t+\varphi)$로 표시된다.

이때 t시각의 교류의 전력은 다음과 같이 계산된다.

$$P=ui=u_0\sin(\omega t+\varphi)\cdot i_0\sin\omega t=\frac{1}{2}u_0i_0[(\cos\varphi-\cos(2\omega t+\varphi)]= \\ =UI\cos\varphi-UI\cos(2\omega t+\varphi) \quad (3)$$

※ $\sin\alpha\cdot\sin\beta=\frac{1}{2}[\cos(\alpha-\beta)-\cos(\alpha+\beta)]$이다.

식 3에서 보는것처럼 교류의 전력이 시간에 따라 2ω의 각주파수로 변하므로 교류의 전력을 순간전력으로 결정할수 없다.(그림 8-28의 ㄴ)

그러므로 교류의 전력은 일정한 시간동안의 전력을 평균한 평균전력으로 결정한다. 한주기 T동안의 전력을 평균하면 식 3의 둘째 마디의 평균값이 령으로 되므로 교류의 전력은 다음과 같다.

$$P=P_R=UI\cos\varphi \quad \textbf{유효전력} \quad (4)$$

식 4로 계산되는 전력은 력학적일이나 열과 같은것으로 소비되는 전력으로서 **유효전력**이라고 부른다.

교류회로에 흐르는 전류와 회로에 걸린 전압의 실효값들의 적으로 표시되는 량을 **피상전력**이라고 부른다.

피상전력은 전원으로부터 공급된 전력을 표시하고 유효전력은 회로에서 소비되는 전력을 표시하며 무효전력은 전원과 회로사이로 오고가는 전력을 표시한다.

피상전력(S)과 무효전력(Q), 유효전력(P)사이의 관계는 그림 8-29에서 보는것처럼 전압 3각형의 매 변에 전류 I를 곱하면 알수 있다.(그림 8-29)

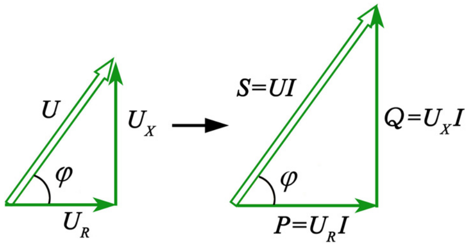


그림 8-29. 피상전력과 무효전력, 유효전력사이의 관계 (전력3각형)

그림으로부터 교류회로에서 피상전력과 무효전력은 다음과 같다.

$$S=UI \quad \textbf{피상전력}$$
$$Q=U_XI=UI\sin\varphi \quad \textbf{무효전력} \quad (5)$$

교류회로에서는 전원으로부터 공급되는 전력보다 회로에서 소비되는 전력이 작으며 소비전력은 식 4에서 보는것처럼 각 φ에 따라 달라진다.

교류전력의 단위

전 력	표 시	단 위	발 음
피상전력	S	VA kVA	바 크바
유효전력	P	W kW	와트 키로와트
무효전력	Q	VAr kVAr	바르 크바르

력 률

공급된 전력중에서 유효하게 쓰인 전력을 알아보기 위하여 력률을 받아들인다.

전체 전력가운데서 실지 유효하게 쓰이는 전력(유효전력)이 얼마나 되는가를 표시하는 비률을 **력률**이라고 부른다.

력률은 유효전력을 피상전력으로 나눈 값

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad \text{력 률}$$

으로 계산한다. 력률은 0~1사이의 값을 가지며 $\cos\varphi=0$이면 회로에서 소비되는 전력이 없으며 $\cos\varphi=1$이면 공급된 전력은 회로에서 모두 유효하게 소비되게 된다.

그림 8-29에서 보는것처럼 무효전력이 작으면 작을수록 φ가 작아지며 공급되는 전력은 유효전력에 가까와간다. 무효저항이 커지면 무효전력이 커지므로 φ가 커지며 력률이 낮아진다.

력률이 낮아지면 발전능력이 제한된 발전소로부터 실제로 소비하는 전력보다 더 많은 전력이 소비지에 공급되므로 전력공급을 긴장하게 하며 송전선이나 배전선으로 필요이상의 전류가 왔다갔다하면서 도중전력손실도 커진다.

그러므로 력률을 높이는것은 전기절약에서 큰 의의를 가지며 력률을 높이는데서 무효저항을 줄이는것이 중요하다.

흔히 쓰이는 전기기구인 교류전동기들에는 선륜이 들어있으므로 력률을 높이기 위하여 권선에 축전기를 련결하여 무효저항을 작게 한다.

력률을 높이기 위해서는 또한 전기기계나 기구들을 무부하상태에서 운전하지 말아야 하며 지나치게 큰 용량을 가진 전기설비는 적당한 용량을 가진 설비로 바꾸어야 한다.

[례제] $R=30\Omega$, $L=0.5\text{H}$인 회로에 $U=220\text{V}$, $\nu=60\text{Hz}$의 교류전압이 걸릴 때 력률과 유효전력은 얼마인가?

풀이. 주어진것: $R=30\Omega$

$U=220\text{V}$

$L=0.5\text{H}$

$\nu=60\text{Hz}$

구하는것: $\cos\varphi$?, P?

$$\cos\varphi=\frac{P}{S}=\frac{I^2R}{I^2\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}=\frac{R}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}=\frac{30}{\sqrt{30^2+(2\times3.14\times60\times0.5)^2}}=0.16$$

$$P=UI\cos\varphi=\frac{U^2}{Z}\cos\varphi=\frac{200^2}{190.8}\times0.16=40.6(\text{W})$$

답. 0.16, 40.6W

문제

1. 다음의 문장에서 틀린것을 찾고 리유를 밝혀라.
   ㄱ) 무효전력은 교류회로에서 소비되지 않고 전원으로 되돌아가므로 랑비되지 않는다.
   ㄴ) 교류전동기에서 무효전력을 작게 하면 유효전력이 커지며 피상전력은 변하지 않는다.
   ㄷ) 력률이 1이면 그 회로에는 유도저항과 용량저항이 없다.
   ㄹ) 교류전력은 매 시각 달라지므로 유효전력과 무효전력, 피상전력도 매 시각 달라진다.
2. 회로의 R, L, C가 각각 어떻게 될 때 력률이 1로 되겠는가?
3. 양수기용전동기에는 정격값들이 $U=220\text{V}$, $I=100\text{A}$, $\cos\varphi=0.8$로 기록되여있다. 정격전압으로 동작할 때 전원으로부터 받는 피상전력, 유효전력 및 무효전력은 얼마인가?

탐구

문제: 전력계와 적산전력계에 대하여 조사하고 설명하여보아라.

방향: ・실험실에 있는 전력계와 적산전력계의 구조를 관찰하고 그림을 그려보아라.
・전력계가 어떻게 부하에서 소비되는 전력을 나타내는가를 전력계의 동작과정을 따지면서 조사하여보아라.
・적산전력계가 어떻게 부하에서 소비되는 전력량(전기에네르기)을 나타내는가를 그의 동작과정을 따지면서 조사하여보아라.
・카드식적산전력계의 동작원리를 문헌에서 조사하여보아라.

복습문제

1. 전기용량이 1μF이고 유도결수가 10mH인 진동회로의 축전기를 24V의 축전지로 충전시킨 다음 회로를 이으면 고유전기진동이 일어난다. 극판의 전기량을 $q = q_0 \sin \omega t$ 와 같은 모양으로 표시하면 극판사이의 전압 u 와 회로에 흐르는 전류 i 는 어떤 식으로 표시되는가?

(답. 24sin10 000t, 0.24cos10 000t)

2. 그림 8-30은 전기진동회로에서의 전압과 전류의 진동그라프이다. 그림에서 t_1시각과 t_2시각사이에 전기마당의 에네르기와 자기마당의 에네르기의 변화과정을 설명하여라.

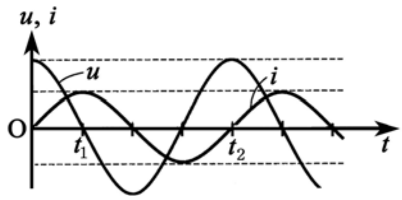


그림 8-30

3. 반경이 r=1.2cm인 두 금속원판이 d=0.3mm만한 간격을 두고 평행으로 놓여있는 축전기와 L=3mH인 선륜으로 이루어진 회로의 고유주기는 얼마인가? 금속원판사이에 유전률이 ε=4인 유전체를 채우면 회로의 고유주기는 얼마로 되겠는가?

(답. 1.26×10^{-6}s, 2.52×10^{-6}s)

4. 그림 8-31에서 전기용량이 C인 축전기에 q_0의 전기량이 쌓여있다. 스위치를 닫았을 때 유도결수가 L_1, L_2인 선륜에 흐르는 전류의 세기의 최대값을 구하여라.

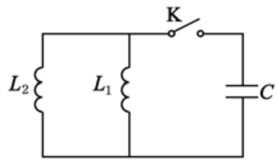


그림 8-31

(답. $i_{01} = \dfrac{q_0}{\sqrt{C(L_2 + L_1)\dfrac{L_1}{L_2}}}$, $i_{02} = \dfrac{q_0}{\sqrt{C(L_2 + L_1)\dfrac{L_2}{L_1}}}$)

5. 전기용량이 0.1μF인 축전기를 5×10^{-5}C의 전기량으로 충전시킨 다음 선륜을 거쳐 방전시키면 감쇠전기진동이 일어난다. 진동이 완전히 멎을 때까지 회로에서 발생하는 열량은 얼마인가?

(답. 1.25×10^{-2}J)

6. R=50Ω인 저항과 L=0.015H인 선륜(선륜의 유효저항은 무시한다.)을 병렬련결하고 교류전압 u=100sin1 000πt [V]를 걸어줄 때 저항과 선륜에 흐르는 전류의 식을 구하여라.

(답. 2sin1 000πt, 2.1sin(1 000$\pi t - \pi/2$))

7. 2kΩ의 저항과 선륜을 직렬련결하고 량끌에 60Hz, $10\sqrt{3}$ V의 교류전압을 걸었을 때 저항기와 선륜에는 10V의 같은 전압이 걸린다. 선륜의 유도결수, 전압과 전류의 자리각차를 계산하여라.(선륜의 유효저항을 고려하여 계산하여라.)

(답. 4.6H, $\pi/6$)

8. 선륜속에 투자률이 μ인 물질을 넣으면 선륜의 유도결수가 μ배 커진다. μ=700인 강자성체로 길이가 15cm이고 자름면적이 1.5cm^{2}인 철심을 만들어 여기에 동선을 몇회 감으면 60Hz의 교류에 대하여 유도저항이 65Ω으로 되겠는가?

(**답.** 443회)

9. 가정용변압기의 입구에는 220V의 교류전압이 걸린다. 만일 입구에 220V의 직류전압을 걸면 어떻게 되겠는가? 왜 그런가?

10. 전기용량이 0.18μF인 축전기와 저항 5.5kΩ을 직렬련결하고 60Hz의 교류전압을 걸었더니 저항에는 실효값이 40mA인 교류가 흐른다. 회로에 걸리는 전압의 실효값과 회로에 흐르는 전류의 세기의 실효값을 구하여라.

(**답.** 629V, 40mA)

11. 전압이 220V인 교류전원에 4μF의 용량을 가진 축전기를 련결하면 276mA의 전류가 흐른다. 이 전원의 주파수를 결정하여라.

(**답.** 50Hz)

12. 유효저항이 R=37Ω인 저항과 유도결수가 L=0.5H인 선륜이 직렬로 련결된 회로에 220V의 직류전압과 교류전압(60Hz)을 각각 걸 때 완전저항과 회로에 흐르는 전류의 세기를 각각 구하여라.

(**답.** 37Ω, 5.95A, 192Ω, 1.15A)

13. 전기용량이 0.15μF인 축전기와 유도결수가 50mH인 선륜이 병렬련결된 회로에 5V의 교류전압이 걸린다. 교류주파수가 1kHz인 때 축전기와 선륜에 흐르는 전류의 세기의 실효값들을 구하여라. 또한 회로에 흐르는 전체 전류의 세기의 실효값은 얼마인가?

(**답.** 4.7mA, 15.9mA, 11.2mA)

14. 교류전압이 U=220V인 때 유효저항 R=20Ω을 가진 선륜으로 교류 I=5A가 흐른다. 유효저항과 유도저항에서의 전압을 구하여라.

(**답.** 100V, 196V)

15. 24V, 35W 전등을 60Hz, 220V의 교류전압에 련결하려고 한다. 전등과 직렬로 전기용량이 얼마인 축전기를 련결해야 하는가? 이때 축전기의 절연내압은 최소한 얼마여야 하는가?

(**답.** 17.67μF, 309.7V)

16. R=2Ω인 저항, $L=\dfrac{1}{\pi}$H인 선륜, $C=\dfrac{1}{\pi}\mu$F인 축전기가 직렬련결된 회로에 고주파발진기를 련결하고 발진주파수를 변화시킨다. 발진기의 전압은 U=2V이다.

ㄱ) 주파수가 얼마일 때 전기공진이 일어나는가?

ㄴ) 전기공진이 일어날 때 전류의 세기의 실효값은 얼마인가?

ㄷ) 전기공진이 일어날 때 유도저항과 용량저항에 걸리는 전압의 실효값은 얼마인가?

(**답.** ㄱ) 500Hz ㄴ) 1A ㄷ) 1000V, 1000V)

17. C=20μF인 축전기와 L=1.38H인 선륜, R=1 000Ω인 저항이 직렬련결된 회로에 60Hz의 주파수를 가진 교류전류가 흐른다. 전류의 세기가 0.15A일 때 회로의 유효전력과 무효전력, 피상전력을 구하여라.

(답. 22.5W, 8.7VAr, 24.1VA)

18. 유효전력이 20kW인 전동기를 380V의 교류전압으로 운전하고있다. 회로에 무효전력을 보상하여 력률을 0.8로부터 0.95로 높여주면 전류는 얼마나 줄어드는가?

(답. 10.4A)

19. 전압이 220V인 전원에 유효 및 무효저항을 직렬련결한 교류회로를 련결하면 력률이 0.6이다. 유효저항 및 무효저항에 걸린 전압을 구하여라.

(답. 132V, 176V)

20. 유효저항이 60Ω이고 유도결수가 0.2H인 전동기에 60Hz, 220V의 교류전압이 걸리면 유효전력은 얼마인가? 력률이 1이 되게 하자면 전기용량이 얼마인 축전기를 전동기에 어떻게 련결해야 하는가?

(답. 312W, 21.5μF, 병렬)

21. 불이 켜져 정상적으로 동작하는 형광등을 유효저항만 가진 요소로 본다면 형광등회로는 그림 8-32와 같이 표시된다. 이 회로에 60Hz, 220V의 교류전압이 걸리면 형광등에는 80V의 전압이 걸리고 0.5A의 전류가 흐른다. 한류기의 유효저항은 20Ω이다. 다음 값들을 구하여라.

ㄱ) 한류기의 유도결수

ㄴ) 회로의 력률

ㄷ) 회로전체의 유효전력과 형광등의 유효전력

ㄹ) 한류기의 무효전력과 회로의 피상전력

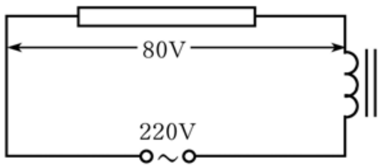


그림 8-32

(답. ㄱ) 1.06H ㄴ) 0.41 ㄷ) 45W, 40W ㄹ) 100.4VAr, 110VA)

제 9 장. 파동의 성질

파동에 대한 지식은 눈부시게 발전하고있는 현대과학과 기술의 성과들을 옳바르게 리해하고 더욱 발전시켜나가는데서 기초적이며 중요한 지식이다.

정보기술의 기초지식으로 되는 전자기파, 빛파동에 대한 지식은 21세기의 시대적요구로부터 학생들모두가 필수적으로 깊이 학습해야 할 내용으로 된다.

이 장에서는 력학적파동이란 무엇이며 그의 수학적표시방법, 파동을 특징짓는 물리적량들과 파동의 일반적성질에 대하여 학습한다.



제 1절. 파동과 그를 특징짓는 량

파 동

잔잔한 물우에 돌을 떨구면 그 자리에서 물면이 오르내리면서 물결이 일어나고 이것이 동그라미를 그리면서 퍼져나간다.(그림 9-1)



그림 9-1. 물면우에서 물결의 전파

줄의 한끝을 고정하고 다른 끝을 아래우 또는 좌우로 흔들면 줄을 따라 진동이 퍼져나간다.(그림 9-2의 ㄱ) 용수철의 한끝을 누르거나 당겼다놓았을 때도 이러한 현상이 나타난다.(그림 9-2의 ㄴ)

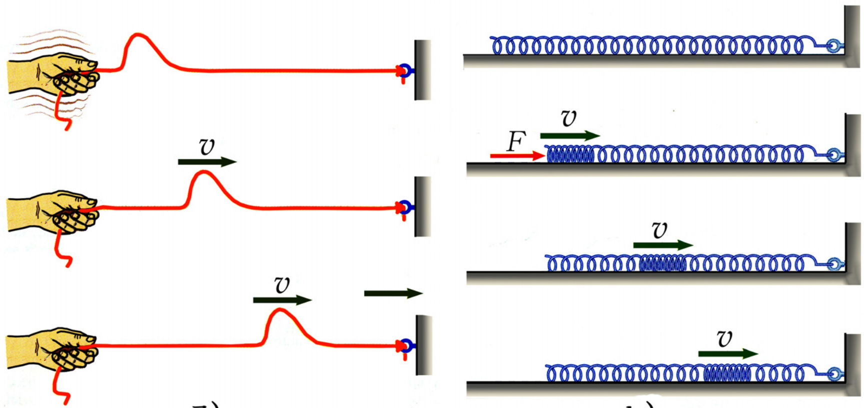


그림 9-2. 줄과 용수철에서의 파동

이와 같이 어떤 자리에서 일어난 물리적변화(진동)가 공간을 따라 퍼지는 현상을 **파동**이라고 부른다.

참고 파동의 에네르기

파동이 전파되여가는 매질알갱이들의 진동에네르기의 총합을 **파동의 에네르기**라고 부른다.

매질속으로 파동이 전파될 때 매질알갱이들은 모두 평형자리를 중심으로 조화진동을 하며 그것을 튐성결수가 k인 용수철의 조화진동으로 대치시키면 그 에네르기의 크기는 $E = kA^2/2 = m\omega^2A^2/2$으로 된다. $\omega = 2\pi\nu$이므로 진동에네르기는 $E = 2\pi^2 m\nu^2 A^2$ 와 같다. 이 식에서 m을 알갱이 하나의 질량이 아니라 파동이 차지하는 구역의 매질의 질량으로 보면 식은 그대로 파동의 에네르기로 된다.

력학적상태의 변화가 퍼지는 파동을 **력학적파동**이라고 부른다.

파동이 시작되는 자리를 **파원**, 파동을 전파시키는 물질을 **파동매질** 간단히 **매질**이라고 부른다.

물면을 따라 파동이 전파될 때 물우에 떠있는 나무토막이나 공은 파동의 전파방향으로 이동해가지 않고 우, 아래로 진동만 한다.

이것은 파동이 퍼질 때 매질알갱이들은 이동하지 않고 그 자리에서 진동만 하며 따라서 퍼져나가는것은 진동모양뿐이라는것을 보여준다.(그림 9-3)

❓ 파동이 퍼질 때 또 무엇이 퍼져나가는가.

파동은 진동이 퍼져나가는것이므로 매질알갱이들은 진동에네르기를 넘겨받는다. 즉 파동은 에네르기를 전달하는 한가지 방식이다.

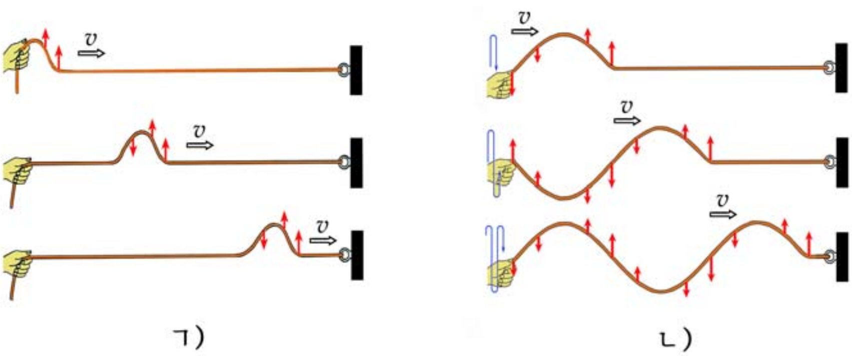


그림 9-3. 파동이 전파될 때 매질알갱이들의 진동방향

가로파와 세로파

고체속에서 어느 한 방향을 x축으로 잡고 이 축우의 알갱이들을 보면 알갱이들이 용수철로 이은것처럼 련결되여 밀힘과 끌힘이 작용한다.

그림 9-4에서 알갱이 1이 축에 수직으로 움직이면 알갱이 2와의 거리가 멀어지고 두 알갱이사이에 끌힘이 작용하면서 알갱이 2가 알갱이 1에 끌리운다. 그러면 알갱이 2는 3으로부터도 멀어지므로 3쪽으로도 약간 끌린다. 그리하여 알갱이 2에는 1과 3으로부터 받는 힘의 합력이 작용하는데 이 힘은 축에 수직으로 향하여 2가 1을 따라 움직이게 된다. 2가 움직이면 3이 뒤따라 같은쪽으로 움직인다.

이런 과정의 련속으로 한 알갱이의 진동이 x축을 따라 차례로 전달되여간다.

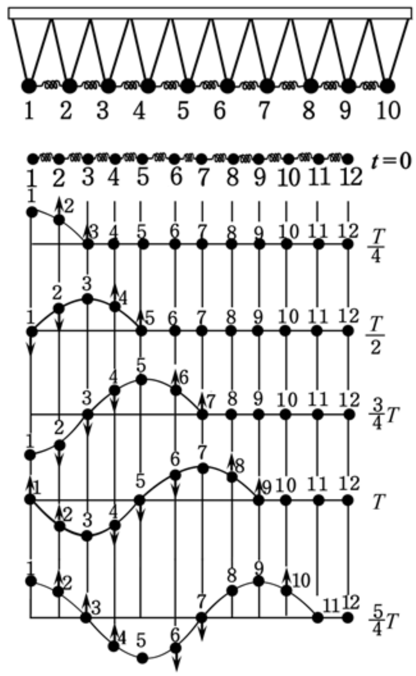


그림 9-4. 가로파의 전파과정

이와 같이 진동방향에 수직으로 퍼져나가는 파동을 **가로파**라고 부른다.

가로파는 쏠림변형에 대하여 튐힘이 나타나야 퍼질수 있다. 그러므로 가로파는 튐성을 가진 고체에서만 퍼진다.

알갱이가 축우에서 진동하면 이웃알갱이사이거리가 커졌다작아졌다하면서 주기적인 힘이 나타난다.(그림 9-5) 이에 따라 진동이 이웃알갱이에 차례로 전달되면서 파동이 생긴다. 이때 파동이 퍼지는 공간에서는 밀도가 밴 곳과 성긴 곳이 번갈아 나타나는데 이에 따라 압축, 팽창이 일어난다. 이러한 변형에 대하여 튐힘이 나타나면 파동이 퍼질수 있다.

진동방향을 따라 퍼지는 파동을 **세로파**라고 부른다.

세로파는 튐성을 가진 모든 고체, 액체, 기체속에서 다 퍼진다.

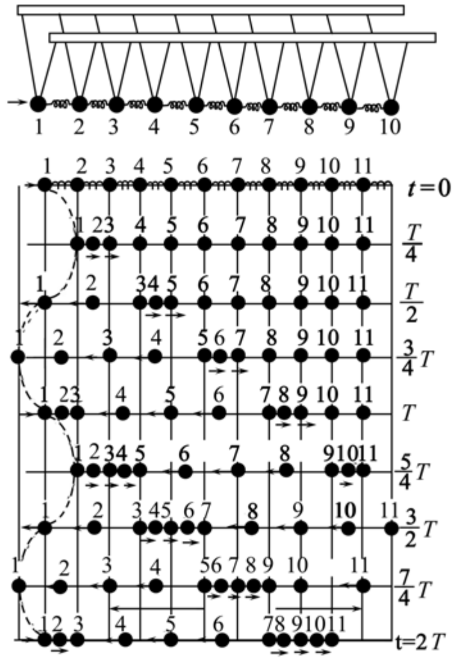


그림 9-5. 세로파의 전파과정

⚠ 매질알갱이들사이의 호상작용이 없으면 파동이 전파될수 없다.

파동을 특징짓는 량

파동은 진동이 전파되여나가는것이므로 진동을 특징짓는 물리적량들인 **진폭**, **진동수**, **진동주기**, **각진동수**가 파동을 특징짓는 량으로도 된다.

이밖에 파동은 파장과 파동의 전파속도로 특징짓는다.

그림 9-4에서 알갱이 1이 x축에 수직인 가로방향으로 진동하면 알갱이 2, 3도 차례로 따라 진동하는데 진동의 자리각이 x축방향으로 가면서 조금씩 늦어진다.

그리하여 마루와 골이 엇바뀌게 되고 이것들이 x축방향으로 옮겨간다.(그림 9-6)

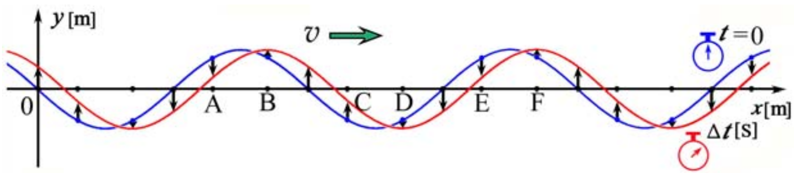


그림 9-6. 가로파에서 마루와 골의 이동

세로파에서도 파동이 퍼지는 방향에 따라 진동의 자리각이 조금씩 늦어진다.

그러므로 매질속에는 알갱이가 밴 곳과 성긴 곳이 번갈아 생기게 된다.

파동이 전파되는 공간에서 같은자리각으로 진동하는 점들을 찾아볼수 있다.

같은자리각으로 진동하는 이웃한 두 점사이거리는 바로 한주기동안에 파동이 퍼져나가는 거리와 같은데 이것을 **파장**이라고 부른다.(그림 9-7)

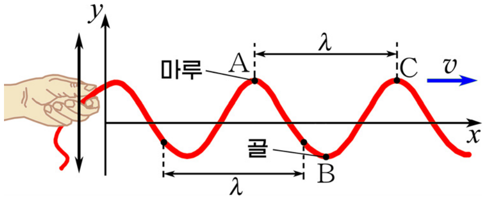


그림 9-7. 파장

가로파에서는 마루와 마루(골과 골)사이, 세로파에서는 밴 곳과 밴 곳(성긴 곳과 성긴 곳)사이의 거리가 파장으로 된다.

파동의 모양이 옮겨가는 속도 즉 파동이 단위시간동안에 퍼져나간 거리와 같은 량을 **파동의 전파속도**라고 부른다. 파동의 전파속도는 단위시간동안에 파동이 퍼져나간 거리와 같은 값을 가진다.

파동이 한주기동안에 파장 λ만큼 전파되므로 파동의 전파속도는 다음과 같이 표시된다.

$$v=\frac{\lambda}{T}=\nu\lambda \qquad \text{파동의 전파속도}$$

파동의 전파속도는 매질에 따라 다르다.

생각하기 그림 9-4에서

ㄱ) 점 1과 자리각이 $\pi/2$만큼 다른 점과 π만큼 다른 점을 찾아보아라.

ㄴ) 점 2와 3은 자리각이 얼마만큼 다른가?

ㄷ) 평형상태에서 2와 3사이 거리는 얼마인가? 파장은 3m이다.

자료 물면파

물면파는 가로파가 아니다.(그림 9-8) 파동의 전파과정에 대한 표상을 쉽게 주기때문에 많은 경우 물면파를 실례로 설명한다.

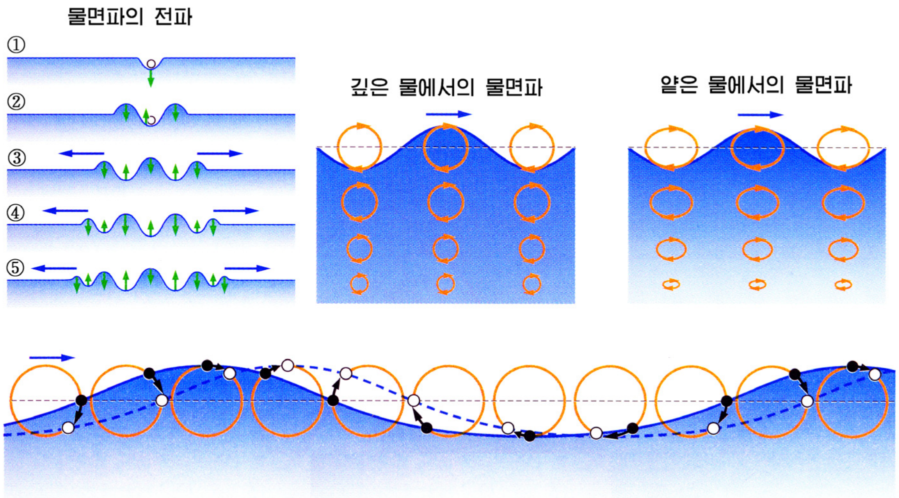


그림 9-8. 물면파

문 제

1. 력학적진동과 력학적파동에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하고 그 근거를 밝혀보아라.
   ㄱ) 력학적진동이 있으면 반드시 력학적파동이 있다.
   ㄴ) 력학적파동이 있으면 반드시 력학적진동이 있다.
   ㄷ) 파동의 진동수는 이 파동에서 매 질점의 진동수와 같다.
   ㄹ) 파동의 전파속도는 이 파동에서 진동하는 질점의 속도와 같다.
2. 그림 9-9에서 가로파가 바줄을 따라 오른쪽으로 전파되여 파동을 이룬다. 이 바줄의 6개 질점에 대하여 다음과 같이 설명하였다.
   어느것이 옳은가?
   ㄱ) 그것들의 진폭은 다같다.
   ㄴ) 질점 D와 F의 속도방향은 같다.
   ㄷ) 질점 A와 D의 속도방향은 같다.
   ㄹ) 질점 B는 C보다 먼저 평형자리에 이른다.

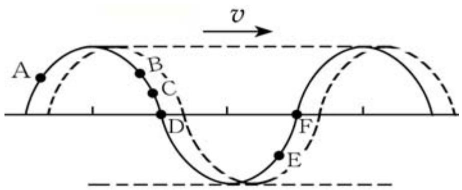


그림 9-9

3. 바다에서 파동의 마루와 마루사이의 거리가 8m이고 바다물에 떠있는 나무토막이 1min동안에 24번 오르내린다면 파동의 전파속도는 얼마인가?
4. 기체나 액체속에서는 가로파가 퍼질수 없다. 왜 그런가?

제2절. 조 화 파 동

조화파동의 식

진동가운데서 가장 간단한것은 조화진동이고 조화진동이 퍼져나가는 파동이 가장 간단한 파동으로 된다. 조화진동이 퍼져나가는 파동을 **조화파동**이라고 부른다.

파원의 처음자리각을 0으로 잡고 그것의 진동을 다음과 같은 식으로 표시할수 있다.

$$y_0 = A\sin\omega t = A\sin 2\pi\nu t \qquad (1)$$

또는 $$y_0 = A\sin\frac{2\pi}{T}t \qquad (2)$$

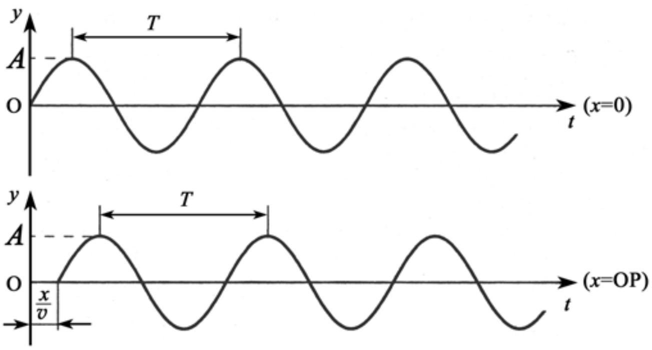


그림 9-10. 파원으로부터 x=OP 만큼 떨어진 점에서의 파동의 시작

파원에 원점을 정하고 x축방향으로 v의 속도로 퍼져나가는 조화파동의 식을 구하자.(그림 9-10)

파동이 파원으로부터 OP=x 만큼 퍼져나가는데는 x/v만 한

시간이 걸리므로 P점은 파원보다 이만큼 늦어 떨게 된다. 그러므로 임의의 t시각까지 파원이 t만 한 시간 떤다면 P점은 이 시각까지 $(t-x/v)$만 한 시간 떤다.

따라서 P점에서의 변위는 x/v 시간전의 O점에서의 변위와 같고 t시각에 P점에서의 변위는 식 1, 2에서 t를 $(t-x/v)$로 바꾼것으로 표시된다. 그러면 x축방향으로 퍼지는 조화파동의 식은 다음과 같다.

$$y=A\sin\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)=A\sin2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{조화파동식} \qquad (3)$$

만일 파원의 처음자리각이 $\varphi_0\neq0$ 이라면

$$y=A\sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\varphi_0\right] \qquad (4)$$

파동의 식에는 두 변수 x와 t가 들어있다. 즉 파동이 퍼질 때 매질알갱이들의 변위는 시간과 자리에 따라 주기적으로 변한다.(그림 9-11)

x가 주어지면 파동의 식은 주어진 점 즉 파원으로부터 x만큼 떨어진 점의 진동식을 표시하며 t가 주어지면 파동의 식은 주어진 시각에 매질알갱이들의 변위 y가 파원으로부터의 거리 x에 따라 어떻게 변하는가 하는 파모양을 나타낸다.

파모양은 파동이 퍼지는 공간에서 어떤 시각에 사진을 찍는다면 사진에 나타나는 모양이다. 조화파동의 파모양은 시누스곡선으로 된다. 세로파의 파모양도 가로파와 같다.(그림 9-12)

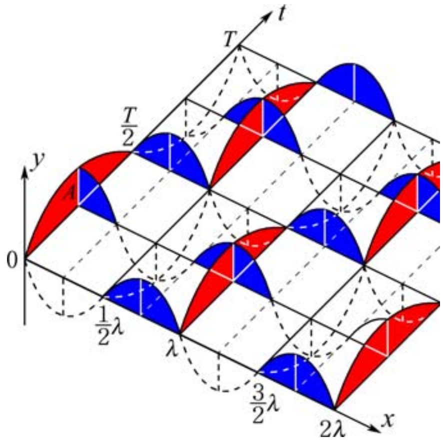


그림 9-11. 조화파동의 그라프

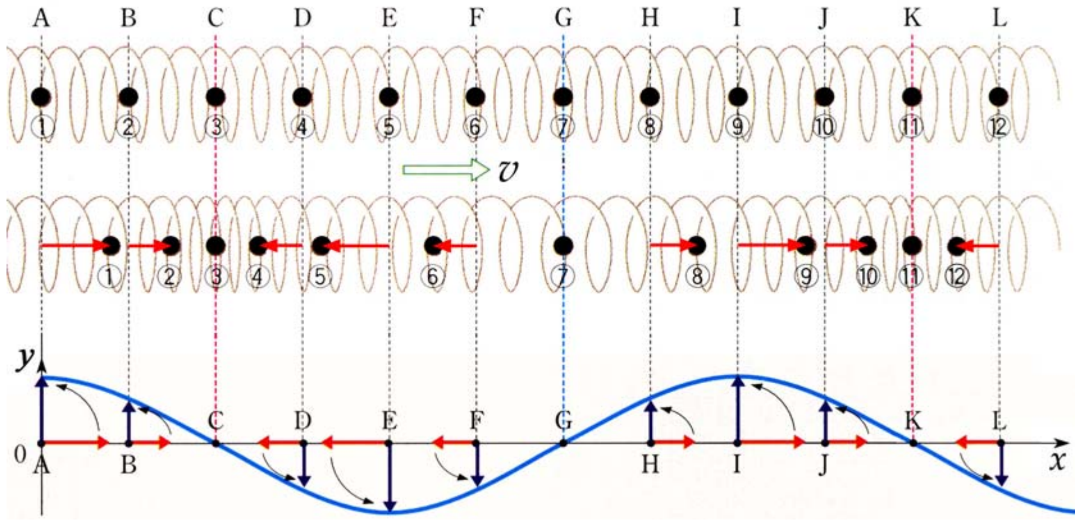


그림 9-12. 세로파의 파모양

생각하기 파동의 식을 리용하여 가로파에서 마루와 골의 자리를 표시하여보아라.

파동의 자리각과 자리각차

진동에서 물체의 자리를 자리각으로 표시한것처럼 파동이 퍼지는 공간의 매 점의 자리(평형자리로부터의 변위)를 표시하는데도 자리각을 쓴다.

파동의 식의 시누스함수안에 있는 각으로 표시된 량을 **파동의 자리각**이라고 부른다. 자리각은 파동이 퍼지는 공간의 매 점의 진동상태(자리)를 특징짓는 량이다.

한 방향으로 퍼져나가는 조화파동에서 파원의 처음자리각이 0일 때 파원으로부터 x만큼 떨어진 점 P에서 t시각의 자리각은 다음과 같다.

$$\varphi(x,\ t)=\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)=2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right) \qquad \text{파동의 자리각} \tag{5}$$

파동의 자리각은 파원으로부터의 거리 x와 시간 t에 관계된다.

파원에서의 자리각은

$$\varphi(0,\ t)=2\pi\frac{t}{T}=2\pi\nu t$$

이다. 주어진 시각에 파원으로부터 x만큼 떨어진 점과 $x+\Delta x$만큼 떨어진 점사이의 자리각차는 다음과 같다.

$$\Delta\varphi=\varphi(x,\ t)-\varphi(x+\Delta x,\ t)=2\pi\frac{\Delta x}{\lambda} \qquad \text{파동의 자리각차} \tag{6}$$

$\Delta x=k\lambda$ (k=0, ±1, ±2, …)인 두 점들의 자리각차는 $\Delta\varphi=2k\pi$이며 이러한 점들은 같은자리각으로 진동한다.

$\Delta x=(2k+1)\frac{\lambda}{2}$인 두 점들의 자리각차는 $\Delta\varphi=(2k+1)\pi$이며 이러한 점들은 서로 반대자리각으로 진동한다.

자리각이 같을 때와 반대일 때 시간차, 거리차, 자리각차는 다음과 같다.

시간차 Δt	$(2k+1)\frac{T}{2}$	kT
거리차 Δx	$(2k+1)\frac{\lambda}{2}$	$k\lambda$
자리각차 $\Delta\varphi$	$(2k+1)\pi$	$2k\pi$
	반대자리각으로 진동	같은자리각으로 진동

그림 9-13에서 같은 기호로 표시된 점들은 같은자리각으로 진동하는 점들이며 ○와 ●, △와 ▲, ◎와 ◉, □와 ■점들은 반대자리각으로 진동하는 점들이다.

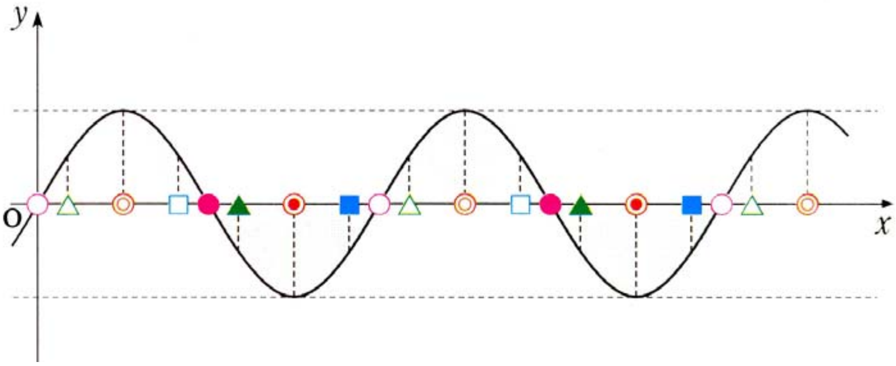


그림 9-13. $\Delta x = k\lambda$ 인 점들은 같은자리각으로,
$\Delta x = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ 인 점들은 반대자리각으로 진동한다

문 제

1. $y = 0.05\sin 4\pi(t - x/10)$ 로 표시되는 파동의 주기, 진동수, 파장 및 전파속도를 구하여라. 그리고 t=0.5s인 때의 파모양, x=0.5m인 점에서의 진동식을 구하고 그라프를 그리여라.
2. 진폭이 3cm, 진동수가 5Hz, 전파속도가 1m/s인 파동이 x방향으로 전파된다. 파동식을 쓰고 $t_1=T$와 $t_2=2.5T$일 때의 파모양을 그라프로 그리여라.
3. 파원으로부터 파동의 전파방향을 따라 x_1=12m, x_2=14.7m 떨어진 두 점에서의 파동의 자리각차가 $\frac{3}{2}\pi$ rad이다. 진동주기가 $T=10^{-3}$s라면 파동의 전파속도는 얼마인가?
4. 바줄을 따라 파동이 어느 한 방향으로 전파된다. 점 C는 점 A, B사이의 중간에 놓여있다. 점 C는 아래와 같이 진동한다. 옳은것을 선택하고 그 근거를 밝혀라.(그림 9-14)

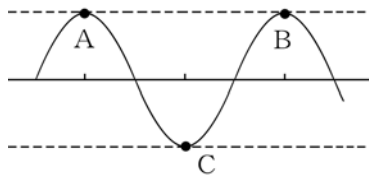


그림 9-14

   ㄱ) 점 A, B와 반드시 같은자리각으로 진동한다.
   ㄴ) 점 A, B와 반드시 반대자리각으로 진동한다.
   ㄷ) 점 A와 같은자리각으로 진동하며 점 B와는 반대자리각으로 진동한다.
   ㄹ) 점 A, B와 같은자리각으로 진동할수도 있고 반대자리각으로 진동할수도 있다.
5. 진동수가 60Hz인 물면파가 0.1m/s의 속도로 퍼질 때 어떤 한 점을 거쳐 1s동안에 몇개씩의 마루와 골이 지나가겠는가?

제 3 절. 파동의 간섭

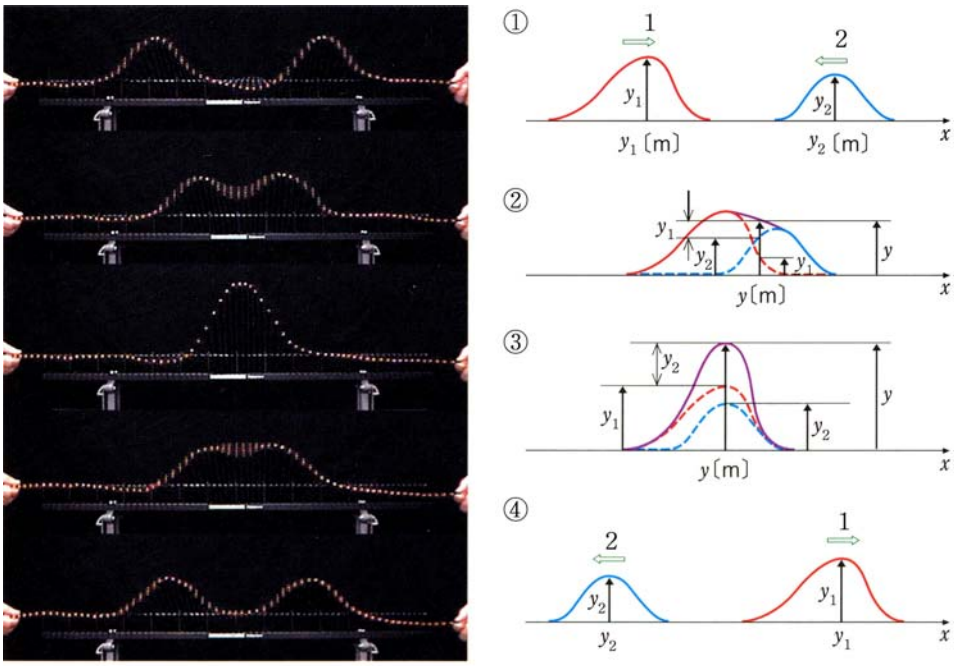
파동의 중첩

강과 호수에서는 수많은 물결이 퍼지면서 겹치여 여러가지 모양의 물결을 이룬다.

여러개의 파동이 전파되면서 공간에서 겹칠 때 서로 어떤 영향을 미치는가를 알아보자.

그림 9-15의 ㄱ에서처럼 파동보이기실험기구의 두 끝을 흔들어놓으면 파동이 서로 마주 향하여 전파된다.

두 파동이 겹치면 합성파모양이 그림 9-15의 ㄴ에서와 같이 되였다가 다시 갈라져서 전파된다.



ㄱ) ㄴ)

그림 9-15. 파동의 중첩

여기서 두 파동이 서로 만났다가 갈라지면 만나기 전과 꼭같은 파모양을 다시 유지하면서 계속 전파되는것을 알수 있다.

이처럼 같은 매질속으로 전파되는 파동들이 중첩될 때 서로 아무런 영향을 미치지 않으며 매개 파동의 파모양이 유지되는 파동의 성질을 **파동의 독립성**이라고 부른다.

파동의 독립성으로 하여 다음과 같은 결론이 나온다.

<u>파동들이 겹친 곳에서 변위는 매 파동에 의한 변위들의 대수적합과 같다.</u> 이것을 **파동의 중첩원리**라고 부른다.

$$y = y_1 + y_2 \qquad \text{파동의 중첩원리} \qquad (1)$$

진동수가 같고 진폭이 A_1, A_2인 두 조화파동이 겹칠 때 합성파의 변위는 같은자리각으로 진동하는 점들에서 A_1+A_2(극대)이고 반대자리각으로 진동하는 점들에서 $|A_1 - A_2|$ (극소)이다. 그밖의 점들에서는 극대와 극소사이의 값을 가진다.

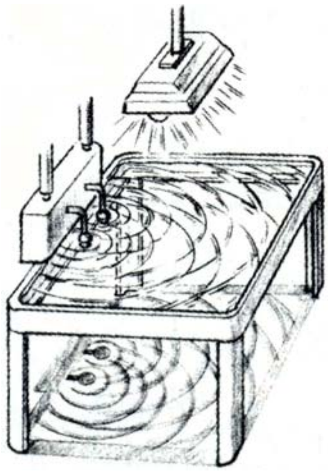


그림 9-16. 물면파실험기구

파동의 간섭

물면에서 퍼져나가는 파동은 눈으로 볼수 있기때문에 파동의 성질을 연구하는데 아주 편리하다.

이제 두 점파원으로부터 진동수와 진동방향이 각각 서로 같은 두 파동이 전파되여 중첩되는 경우를 실험으로 알아보자.

실험

○ 물면파실험기구의 물그릇에 물을 붓고 물면우의 두 점을 같은자리각으로 진동하게 한다.(그림 9-16)

○ 두 파동이 중첩되는 부분을 살펴본다.

두 점파원에서 퍼져나온 파들이 겹친 구역을 보면 세게 떠는 점들과 거의 떨지 않는 점들이 있고 이것들이 이룬 선들이 엇바뀌여 배치된 무늬를 볼수 있다.(그림 9-17)

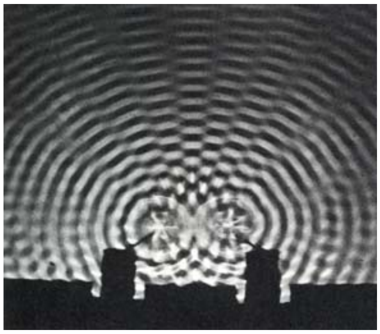


그림 9-17. 물면파의 간섭무늬

이와 같이 두개 또는 그 이상의 파동들이 중첩할 때 세게 진동하는 자리와 약하게 진동하는 자리가 고정되여 나타나는 현상을 **파동의 간섭**이라고 부른다. 그리고 간섭결과에 이루어진 극대, 극소분포를 보여주는 무늬를 **간섭무늬**라고 부른다.

그림 9-18에는 같은자리각으로 진동하는 두 점파원에서 퍼지는 파동에서 어떤 순간의 마루(실선)와 골(점선)들을 보였다.

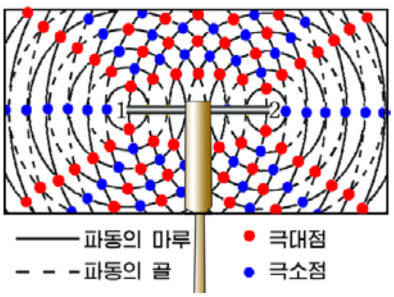


그림 9-18. 간섭의 극대와 극소

마루와 마루(실선과 실선) 또는 골과 골 (점선과 점선)이 겹친 곳(붉은색점)에서는 두 파동에 의한 진동이 같은자리각(자리각차 $\Delta\varphi = 2k\pi$)으로 일어나므로

합성진동이 가장 세고 진폭은 $A=A_1+A_2$로서 극대가 된다.

마루와 골(실선과 점선)이 겹친 곳(푸른색점)에서는 반대자리각 $(\Delta\varphi=(2k+1)\pi)$을 가진 진동들이 합성되므로 합성진동이 가장 약하고 진폭은 $A=|A_1-A_2|$로서 극소가 된다.

그림 9-19에서 두 파원 S_1과 S_2로부터 고찰점까지의 거리 r_1과 r_2의 차 Δr가 파장의 옹근수배($k\lambda$)이면 그 점(P)은 극대자리가 되고 반파장의 홀수배($(2k+1)\lambda/2$)이면 그 점(Q)은 극소자리가 된다.

여기서 Δr는 두 파원으로부터 고찰점까지의 거리차로서 **행로차** 또는 **경로차**라고 부른다.

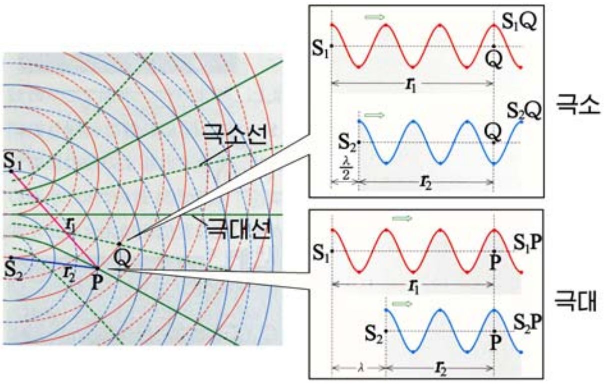


그림 9-19. 간섭의 극대와 극소에서의 행로차

$$\Delta r = k\lambda \qquad \text{간섭의 극대}$$
$$\Delta r = (2k+1)\cdot\frac{\lambda}{2} \qquad \text{간섭의 극소} \qquad (2)$$
$$k=0,\ \pm1,\ \pm2,\cdots$$

간섭조건

간섭무늬가 생기자면 합성진동이 센 자리는 계속 세게 진동하고 합성진동이 약한 자리는 계속 약하게 진동해야 한다.

한 점에서의 합성진동이 세졌다약해졌다하면서 극대로 되였다가 극소로 되면서 왔다갔다한다면 간섭무늬가 생길수 없다.

즉 합성진동이 극대로 되는 자리들과 극소로 되는 자리들이 고정되여야 간섭무늬가 생기는데 그렇게 되자면 파동이 겹치는 공간의 매 점에서 두 파동에 의한 진동의 자리각차가 일정해야 한다.(그림 9-20)

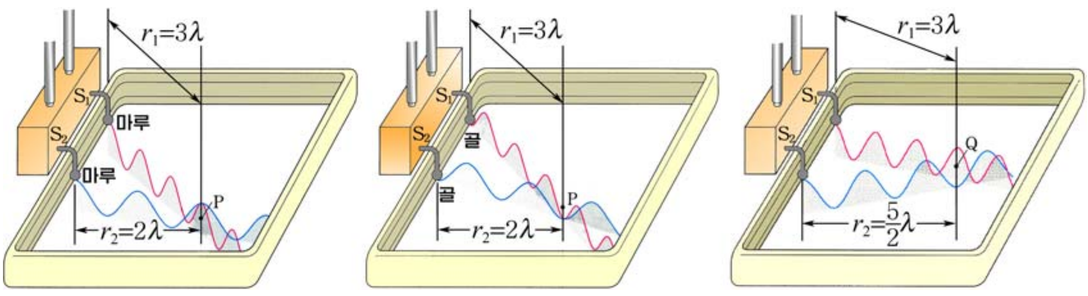


그림 9-20. 행로차에 따르는 극대와 극소

따라서 간섭이 일어나기 위한 구체적인 조건은 다음과 같다.

우선 두 파동의 진동수(각진동수)가 같아야 한다.

또한 두 파동의 처음자리각차가 일정해야 한다.

이 두 조건이 동시에 만족되여야만 겹치는 파동들의 자리각차가 시간에 따라 변하지 않는다. 이 조건을 만족시키는 파원을 **간섭성파원**이라고 부른다.

[례제] 같은자리각으로 진동하는 두 파원에서 어떤 점 A까지의 거리가 각각 45cm, 60cm이다. 파동의 파장이 30cm라면 간섭결과 점 A는 어떤 진폭으로 진동하겠는가? 두 파동의 진폭은 같다.

풀이. 주어진것: r_1=45cm

r_2=60cm

λ=30cm

구하는것: A?

$$\Delta r = r_2 - r_1 = 60 - 45 = 15\ (\text{cm})$$

조건으로부터 $\Delta r = \dfrac{\lambda}{2}$ 이므로 극소조건에 맞는다.

답. 0

문 제

1. 두 파원의 진동수가 다르거나 그것들이 제가끔 떨었다멎었다한다면 간섭무늬가 생기겠는가?
2. 같은자리각으로 진동하는 두 점파원으로부터 경로차가 2cm인 자리는 간섭의 극대자리이고 이 자리에서 가장 가까운 극소자리까지의 경로차는 1cm이다. 간섭하는 파동들의 파장은 얼마인가?
3. 두 파원이 반대자리각으로 진동한다면 극대와 극소조건이 어떻게 변하겠는가?
4. 파동의 간섭에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 옳은것을 선택하고 그 근거를 밝히여라.

ㄱ) 간섭무늬는 두 파원의 진동수가 반드시 같아야 이루어진다.

ㄴ) 간섭무늬는 두 파원이 반드시 같은자리각으로 진동할 때에만 이루어진다.

ㄷ) 간섭무늬는 두 파원이 반대자리각으로 진동할 때에도 이루어질수 있다.

ㄹ) 진동수와 진동방향이 같은 두 파원은 반드시 간섭성파원이다.

제 4 절. 정 상 파

정 상 파

한끝이 고정된 줄의 다른 끝을 흔들어 줄을 따라 전파되던 파동이 고정된 끝에서 반대방향으로 전파되게 하여 겹치면 어떻게 되겠는가.

실 험

○ 바줄의 한끝을 고정하고 다른 끝을 옆으로 흔든다. 줄을 따라 가는 파동과 오는 파동이 중첩된다.

○ 줄끝을 천천히 흔들다가 점점 빨리 흔들어 진동수를 높여가면서 관찰한다. 어떤 진동수에 이르면 세게 떠는 자리와 전혀 떨지 않는 부분들이 생겨나는데 진동수를 더 크게 하면 이러한 자리들이 더 많이 생겨난다.(그림 9-21)

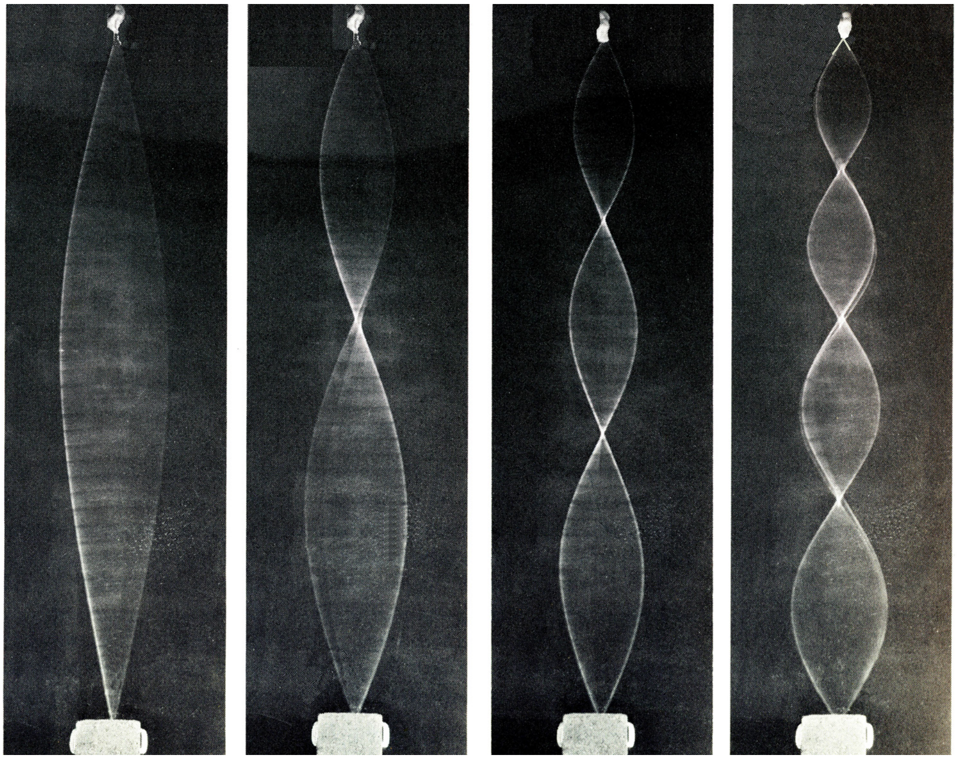


그림 9-21. 줄에서의 정상파

세게 떠는 자리를 **배**, 떨지 않는 자리를 **마디**라고 부른다.

마디와 배들이 생길 때 파동은 어느쪽으로도 나가지 않는다. 이런 현상은 줄을 따라 한쪽으로 퍼져나가는 파동과 그것이 반사되여 되돌아오는 파동이 겹쳐 간섭한 결과에 생긴다. 이처럼 진동수와 진폭이 같은 두 파동이 마주 퍼질 때 이것들이 간

섭한 결과에 배와 마디가 번갈아 나타나 멎어있는것처럼 보이는 파동을 **정상파**라고 부른다.

그림 9-22에는 파장 λ와 진폭 A가 같은 두 파동이 한 직선우에서 마주 퍼져나갈 때 합성파의 모양을 $T/8$간격으로 보였다. $T/8$동안에 파동은 $\lambda/8$만큼씩 마주 나간다.

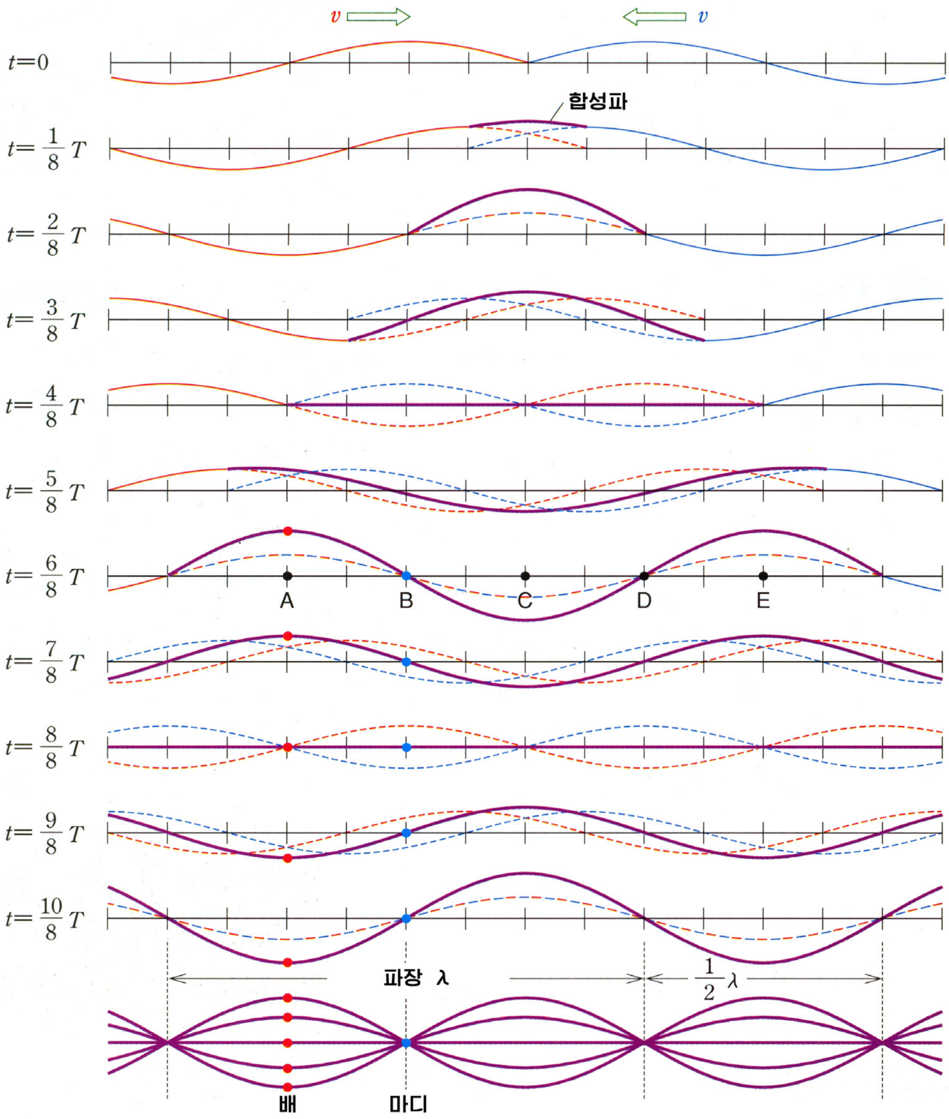


그림 9-22. 정상파형성과정

한주기동안 합성파를 살펴보면 B, D에서는 마주 퍼지는 파동의 자리각이 계속 반대여서 합성진폭이 0이 된다. 이 점들은 마디가 된다.

마디사이의 중간점들인 A, C, E에서는 두 파동이 같은자리각으로 만나므로 합성진폭이 $2A$로서 극대가 된다. 이 점들은 배가 된다.

정상파는 자기의 고유한 형태로 하여 앞에서 본 일반적인 조화파동과 다른 일련의 특징을 가진다.

첫째로, 파동의 모양과 에네르기가 전파되여나가지 않는다.

둘째로, 진폭이 최대인 배와 최소인 마디가 고정되여있으며 배와 마디사이에서는 자리에 따라 진폭이 다르다.

셋째로, 이웃한 두 마디사이의 점들은 같은자리각으로 진동하며 마디량쪽의 점들은 반대자리각으로 진동한다.

두끝이 고정된 줄에서 정상파

두끝이 고정된 줄의 길이와 파장사이에 어떤 관계가 있겠는가.(그림 9-23)

배가 하나 생겼을 때 $\ell = \frac{\lambda_1}{2}$

배가 2개 생겼을 때 $\ell = 2 \cdot \frac{\lambda_2}{2}$

배가 n개 생겼을 때 $\ell = n \frac{\lambda_n}{2}$

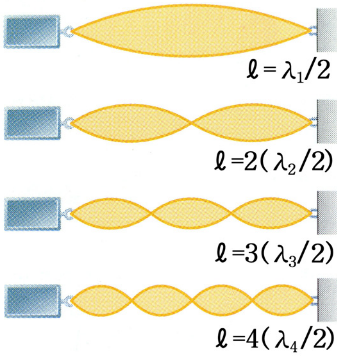


그림 9-23. 두끝이 고정된 줄에서 정상파

따라서 이때 정상파의 파장은 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n} \ (n=1,\ 2,\ 3,\ \cdots) \quad \text{두끝이 고정된 줄에 생기는 정상파의 파장} \tag{1}$$

두끝이 고정된 줄에 정상파가 이루어지면 그 줄에서 고유진동이 일어난다.

배가 하나만 생기는 고유진동($n=1$)을 **기본진동**이라고 부르며 배가 여러개 생기는 고유진동($n=2,\ 3, \cdots$)을 **배진동**이라고 부른다.

줄을 따라 퍼지는 파동의 속도가 v라면 고유진동수는 다음과 같다.

$$\nu_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2\ell} n \ \ (n=1,\ 2, \cdots) \quad \text{줄의 고유진동수} \tag{2}$$

줄의 고유진동수는 실의 길이에 거꿀비례하고 파동의 전파속도에는 비례한다.

반파장손실

매질의 경계에서 반사하는 파동은 자리각의 변화가 생길수 있다.

고정된 끝에 마디가 있다는것은 입사파와 반사파의 자리각이 정반대라는것을 보여준다.(그림 9-24)

공기속에서 전파되던 파동이 고체나 액체겉면에서 반사되는 때를 실례로 들수 있다.

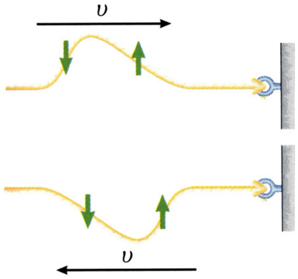


그림 9-24. 반사파는 변위방향이 바뀐다

일반적으로 파동이 성긴 매질에서 밴 매질로 들어가는 경계에서 반사할 때에는 자리각이 π 만큼 변한다. 이것은 입사파가 $\lambda/2$만큼 잘리우고 반사파로 되는것과 같다.

이처럼 반사할 때 자리각이 π 만큼 변하는것을 **반파장손실**이라고 부른다.

파동이 보다 더 성긴 매질로 들어가는 경계에서 반사할 때에는 반파장손실이 없다.

생각하기 한끝은 고정되고 다른 끝은 자유로운 금속띠가 떨 때 고정끝에는 마디, 자유끝에는 배가 있게 된다. 띠의 길이가 ℓ 이고 띠에서의 파동의 전파속도가 v라면 띠의 고유진동수는 얼마인가?

문 제

1. 띠의 자유끝에서 반사하는 파동의 자리각변화는 얼마인가?
2. 진폭이 2cm이고 파장이 20cm인 두 파동이 겹쳐 정상파를 이루었다. 배와 배사이의 거리, 배에서의 진폭은 얼마인가?
3. 8.5cm 떨어져있는 두 점파원이 같은자리각으로 떨면서 물결을 일군다. 진동수가 20Hz이고 물결이 퍼지는 속도가 0.2m/s일 때 파원사이에 이루어진 정상파에는 몇개의 마디와 배가 있겠는가?
4. 정상파에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 옳은것을 선택하고 그 근거를 밝히여라.
   ㄱ) 정상파는 파동의 간섭의 특수경우이다.
   ㄴ) 정상파의 마디는 두 파동의 변위가 0인 점들이 합성된 자리들이다.
   ㄷ) 정상파에서 진폭이 최대인 자리는 반드시 배로 된다.
   ㄹ) 파동이 서로 다른 매질의 경계에서 반사할 때 반드시 반파장손실이 일어난다.

참고 정상파의 식

정상파는 서로 반대방향으로 퍼지는 진폭이 A이고 각진동수가 ω인 두 조화파들의 합성결과이다.

$$y_1 = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{v}\right), \qquad y_2 = A\sin\omega\left(t + \frac{x}{v}\right)$$

$$y = y_1 + y_2 = \left(2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\sin\omega t \qquad \text{정상파의 식}$$

이 식에서 $A(x) = 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x$ 가 정상파의 진폭이다. 정상파의 식에 정상파의 특징이 다 담겨있다.

제 5 절. 파동의 에돌이와 후이겐스의 원리

파 면

우리는 앞에서 전기마당속에서 전위가 같은 점들로 이루어지는 면인 등전위면에 대하여 학습하였다.

그렇다면 파면은 어떤 면인가.

한 점에서 일어난 물결은 동그라미를 그리면서 퍼져나간다. 이때 파원에 중심을 둔 한 원둘레우의 점들은 언제나 같은 진동상태에 있다. 다시말하여 마루가 될 때에는 다같이 마루가 되고 골이 될 때에는 다같이 골이 된다. 즉 같은자리각으로 진동한다. 공간에서 퍼지는 파동에서도 자리각이 같은 점들을 찾을수 있다.

이 점들을 이어놓으면 어떤 면을 이룬다.

파동이 퍼질 때 자리각이 같은 점들이 이루는 면을 **파면**이라고 부른다. 파면을 **같은자리각면**이라고도 부른다.

파면들이 구면인 파동을 **구면파**, 파면들이 평면인 파동을 **평면파**라고 부른다.(그림 9-25)

일반적으로 점파원에서 나오는 파동은 구면파를 이룬다.

그러나 점파원으로부터 매우 먼 거리에서는 제한된 범위안에서 파면이 평면에 가까우므로 평면파로 볼수 있다. 파동이 퍼져나가는 과정을 파면이 전진하는것으로 고찰할수 있다. 파동이 퍼져나가는 방향으로 그은 선을 **파선**이라고 부른다.

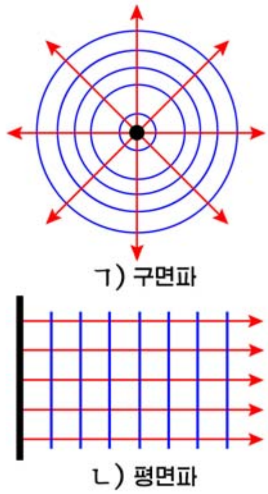


그림 9-25. 파면과 파선

파선은 파면에 수직이다.

파면을 그릴 때 파면사이간격은 대체로 옹근파장너비로 되게 그린다.

평면파의 진폭은 일정하지만(흡수가 없는 고른 매질속에서) 구면파의 진폭은 퍼져나가면서 작아진다. 그것은 평면파에서는 파동의 흐름이 한 방향으로만 일어나므로 전파방향으로 가면서 흐름이 변함없이 일정하지만 구면파에서는 흐름이 반경방향으로 점점 넓은 공간으로 퍼져나가므로 약해지기때문이다.

그러므로 흡수가 없는 고른 매질속에서 평면파, 구면파는 다음과 같이 표시된다.

$$y=A\sin\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)=A\sin2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)$$ **평면파동식**

$$y=\frac{A}{r}\sin\omega\left(t-\frac{r}{v}\right)=\frac{A}{r}\sin2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{r}{\lambda}\right)$$ **구면파동식**

파동의 에돌이

파동이 고른 매질속에서 퍼지면 파면의 모양은 변하지 않으며 한 파면과 그다음 파면사이 거리는 어디서나 같다. 즉 파동은 고른 매질속에서 곧추 퍼진다. 파동이 곧추 퍼지기만 한다면 장애물을 만났을 때 그뒤로는 파동이 퍼져나가지 못할것이고 파동이 없는 구역인 《그림자》가 생길것이다.(그림 9-26)

파동이 퍼지다가 장애물을 만나면 그의 기슭이나 틈을 지나면서 파동의 일부가 방향을 바꾸는 현상을 **파동의 에돌이**라고 부른다.

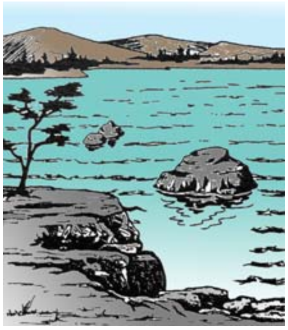


그림 9-26. 바위뒤에 생기는 물결의 《그림자》

실험



○ 물면파실험기구의 물그릇에 물결을 일구고 크기가 다른 가림판(장애물)을 차례로 세워 파면을 막고 그 뒤부분의 파동을 살핀다.(그림 9-27)

○ 두개의 가림판으로 틈을 만들고 틈의 너비를 변화시키면서 그것을 지난 파동을 살핀다.(그림 9-28)

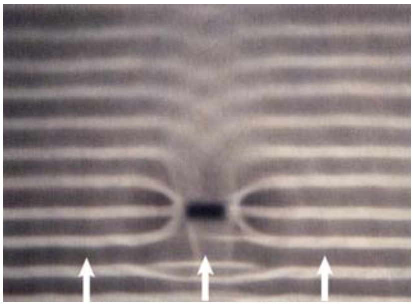


그림 9-27. 장애물뒤의 에돌이파

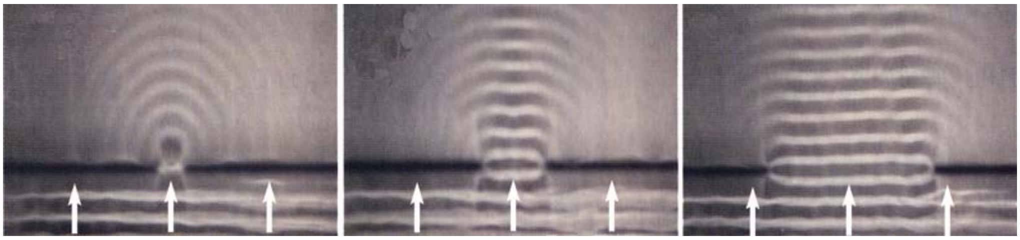


그림 9-28. 틈의 너비에 따르는 파동의 모양

⚠ 에돌이는 간섭과 함께 파동에서만 나타나는 특징적인 현상이다.

? 장애물뒤에서 파동의 모양은 어떻게 되는가. 틈을 지날 때 파동이 퍼지는 방향은 틈의 크기에 따라 어떻게 되는가.

장애물이나 틈이 파장보다 그리 크지 않을 때 에돌이가 심하게 나타난다.

장애물이 작거나 대단히 크면 그뒤에 《그림자》가 생기고 그 기슭에만 에돌이파가 들어간다.

틈이 좁으면 에돌이가 심하여 틈을 지난 파동은 넓은 구역으로 퍼진다.

틈이 넓으면 에돌이는 약하게 나타나고 틈에 들어온 파동은 대부분이 본래방향으로 나간다.

틈이 완전히 열려 파면이 막히지 않으면 파동은 곧추 퍼져나간다.

파장에 따라서도 에돌이가 달라진다. 파장이 길수록 파동은 더 잘 에돌고 파장이 짧을수록 잘 에돌지 않고 곧추 퍼지는 성질이 있다.

일반적으로 파동의 에돌이현상은 장애물이나 틈의 크기가 파장정도일 때 잘 나타난다.

후이겐스의 원리

파동의 전파를 연구하는데서는 한 파면을 알고 그다음 파면을 찾아야 할 때가 많다. 이 문제를 어떻게 풀것인가.

그림 9-29에서 틈은 그 자리에 파원이 있을 때와 같은 역할을 한다.

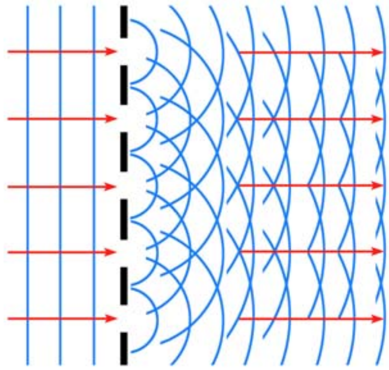


그림 9-29. 여러 점들에서 생기는 요소파

? 한개 틈대신 여러개의 틈이 있다면 매개 틈으로부터는 어떤 모양의 파면이 생기며 이것들이 겹치면 파면은 어떻게 되겠는가.

실험들에서 알수 있는것처럼 파동이 도달한 점들은 새로운 파원과 같은 역할을 한다. 이런 점들로부터는 새로운 구면파가 생기는데 이것을 **요소파** 또는 **2차파**라고 부른다.

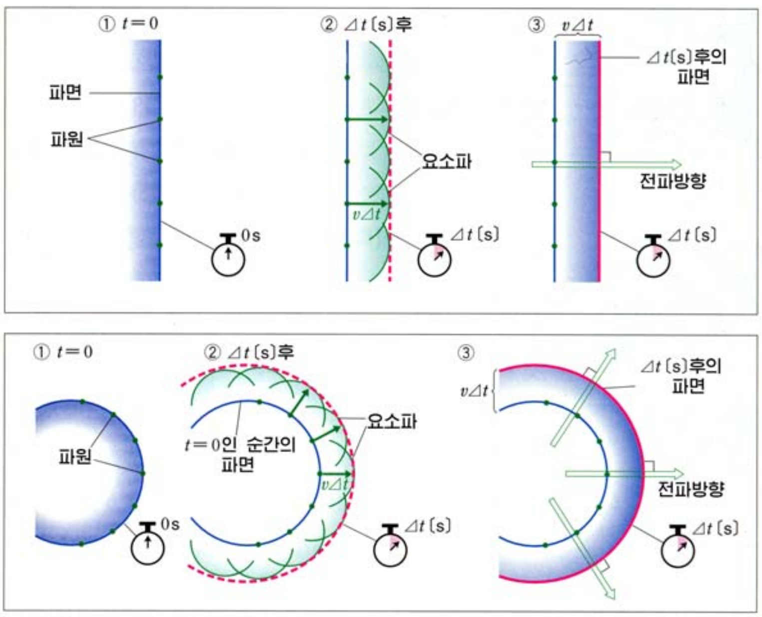


그림 9-30. 요소파들의 포락면이 다음 파면으로 된다

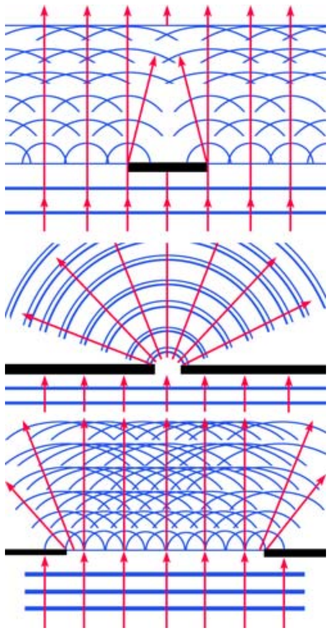


그림 9-31. 장애물이나 틈에서 요소파

매개 점들에서 나오는 요소파들이 겹쳐서 다음 파면을 이룬다. 이 파면은 요소파의 파면들에 공통으로 접하는 면 즉 포락면이다.

파동이 퍼질 때 임의의 파면우의 모든 점은 점파원으로 되여 요소파를 이루며 이 요소파의 파면들의 포락면(공통으로 접하는 면)이 다음 파면으로 된다. 이것을 **후이겐스의 원리**라고 부른다.(그림 9-30)

후이겐스의 원리를 쓰면 어떤 순간의 파면을 알고 다음 순간의 파면의 모양을 알수 있으며 따라서 파동의 전파방향을 찾아낼수 있다.

또한 파동의 에돌이현상을 잘 설명할수 있다.

그림 9-31에서 보는것처럼 장애물이나 틈에 도달한 파면의 매 점으로부터 퍼져나가는 요소파들을 그려보면 장애물이나 틈의 기슭에서 파면이 구부러진다는것을 알수 있다.

문 제

1. 파동이 도달한 점들을 요소파의 파원으로 볼수 있는것은 무엇때문인가?
2. 후이겐스의 원리에 의하여 어떤 순간의 파면이 평면을 이루었을 때 다음 순간의 파면을 그려보아라.
3. 그림 9-32에서와 같이 하나의 파원에서 나오는 파동은 2개의 실틈을 지난 다음 간섭을 일으킨다. 그 리유를 설명하여라.



그림 9-32

제 6 절. 파동의 반사와 굴절

파동의 반사법칙과 굴절법칙

고른매질속에서 파동은 곧추 퍼진다.

파동이 퍼지다가 다른 종류의 매질(파동의 전파속도가 다른 매질)의 경계면에 이르면 일부는 반사하고 일부는 경계면을 지나면서 굴절된다.

파동이 전파되다가 다른 매질의 경계면에서 처음매질속으로 되돌아나오는 현상을 **파동의 반사**라고 부르며 다른 매질속으로 꺾이여들어가는 현상을 **파동의 굴절**이라고 부른다.

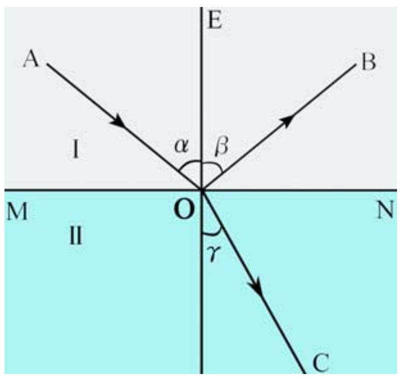


그림 9-33. 파동의 반사각과 굴절각

파동이 Ⅰ매질속에서 속도 v_1로 퍼져오다가 Ⅱ매질과의 경계면 MN에 도달하면 반사와 굴절이 일어난다.(그림 9-33)

여기서 AO는 입사파선, OB는 반사파선, OC는 굴절파선이다.

경계면에 세운 수직선 OE와 입사파선이 이루는 면을 **입사면**이라고 부른다.

경계면 MN에 세운 수직선 OE와 입사파선사이의 각을 **입사각**(α), EO와 반사파선사이의 각을 **반사각**(β), OE와 굴절파선사이의 각을 **굴절각**(γ)이라고 부른다.

실험

○ 물면파실험기구의 물그릇에 반사면을 세우고 여기에 구면파를 보낸다. 반사면을 돌려 입사각을 변화시키면서 입사각과 반사각을 재여본다.

○ 물면파실험기구의 물그릇의 한 부분에 두께가 물의 깊이보다 작은 유리판을 깔아 Ⅱ부분의 물이 Ⅰ부분의 물보다 얕게 한다.

○ Ⅰ부분에 평면파를 일구고 입사각과 굴절각을 비교한다.(그림 9-34)

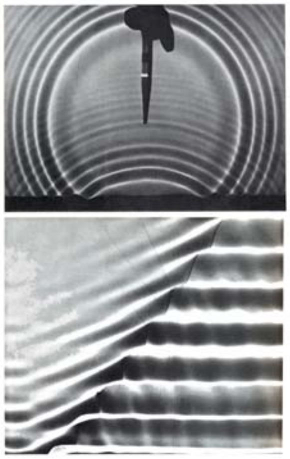


그림 9-34. 파동의 반사법칙과 굴절법칙 알아보는 실험

실험으로부터 반사각은 입사각과 같으며 굴절각은 입사각보다 작아진다는것을 알수 있다.

※ 얕은 물에서 물면파의 전파속도는 $\sqrt{h}$ 에 비례한다.

이것은 Ⅰ부분보다 Ⅱ부분에서 물면파가 더디게 퍼져나간다는것을 보여준다.

즉 $$v_1 > v_2$$

따라서 실험은 파동의 전파속도가 큰 매질에서 전파속도가 작은 매질로 들어갈 때 굴절각은 입사각보다 작아진다는것을 보여준다.

이것을 식으로 쓰면

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{v_1}{v_2}$$

와 같다.

이로부터 반사법칙과 굴절법칙을 다음과 같이 정식화할수 있다.

<u>첫째로, 반사파선과 굴절파선은 입사파선과 함께 다같이 입사면우에 있다.</u>

<u>둘째로, 반사각은 입사각과 같다.</u>

$$\alpha=\beta \quad \textbf{파동의 반사법칙} \qquad (1)$$

<u>셋째로, 입사각과 굴절각의 시누스의 비는 두 매질에서의 파동의 전파속도의 비와 같다.</u>

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{v_1}{v_2} \qquad \text{파동의 굴절법칙} \qquad (2)$$

후이겐스의 원리에 의한 반사 및 굴절법칙 설명

반사법칙. 후이겐스의 원리를 쓰면 파동의 반사법칙을 쉽게 설명할수 있다.(그림 9-35)

파동이 입사파의 파면 AC의 한 점 C로부터 경계면의 한 점 B에 이르는데 t만 한 시간이 걸린다면 그동안에 A점에서 반사한 반사파는 D점에 도달한다. 같은 매질이므로 파동의 전파속도가 같아 CB=AD이다.

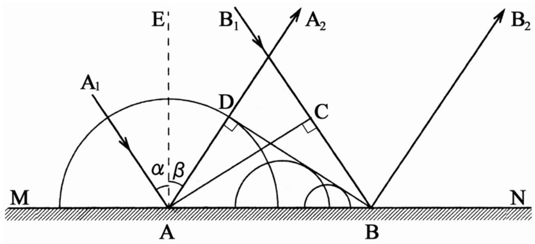


그림 9-35. 후이겐스의 원리에 의한 반사법칙 설명

A와 B사이의 점들로부터는 조금씩 늦어서 반사되여 이 요소파들의 포락면 BD가 반사파의 파면으로 된다.

즉 △ABC와 △ABD는 꼭같은 3각형이므로 ∠BAC=∠ABD이다. 그런데 ∠BAC=α, ∠ABD=β이다. 따라서

$$\alpha=\beta$$

굴절법칙. 후이겐스의 원리를 리용하여 굴절법칙을 설명하자.(그림 9-36) 파동이 입사파의 파면 AC의 한 점 C로부터 Ⅰ매질속에서 v_1의 속도로 B점에 이르는데 t시간 걸린다면 그동안에 A점으로부터는 Ⅱ매질속으로 v_2의 속도로 점 D에 이르게 된다.

A와 B사이에 있는 점들로부터는 조금씩 늦어서 요소파들이 퍼져나가게 되여 이 요소파들의 포락면 BD가 굴절파의 파면으로 된다.

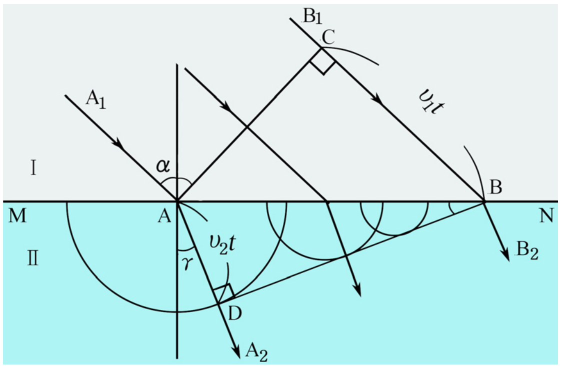


그림 9-36. 후이겐스의 원리에 의한 굴절법칙 설명

△ABC와 △ABD에서 각 α와 γ의 시누스를 구하여 그 비를 구하면 식 2와 같은 식을 얻을수 있다.

$$\sin\alpha=\frac{BC}{AB}=\frac{v_1t}{AB}, \qquad \sin\gamma=\frac{AD}{AB}=\frac{v_2t}{AB}$$

따라서

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{v_1}{v_2}$$

[례제] 굴절법칙을 표시하는 식을 파장으로 표시하여보아라.

풀이. 두 매질속으로 퍼져나가는 파동의 진동수를 ν, 파장을 각각 λ_1, λ_2로 표시하면

$$v_1=\lambda_1\nu, \qquad v_2=\lambda_2\nu$$

따라서 식 2는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{\lambda_1\nu}{\lambda_2\nu}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

문 제

1. 입사파선이 그림 9-37과 같이 주어졌을 때 반사파와 굴절파의 파면과 파선을 그리여라. 첫째 매질에서의 파동의 전파속도는 둘째 매질에서의 파동의 전파속도보다 1.5배 크다.

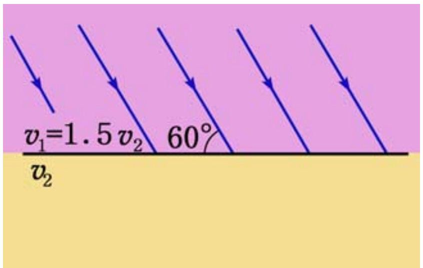


그림 9-37

2. 진동수가 440Hz인 소리가 공기속에서 340m/s의 속도로 퍼지다가 9.8°의 각으로 물면에 입사하여 49°의 각으로 굴절한다. 물속에서 소리의 파장을 구하여라.
3. 바다나 호수에서는 물결이 언제나 기슭에 평행으로 밀려온다. 그것은 무엇때문인가?
4. 파동의 반사와 굴절에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 옳은것을 선택하고 그 근거를 밝히여라.

   ㄱ) 같은 매질속에서 반사파의 전파속도는 입사파의 전파속도와 반드시 같다.

   ㄴ) 입사파의 전파속도는 굴절파의 전파속도보다 반드시 크다.

   ㄷ) 굴절각은 반드시 입사각보다 작다.

   ㄹ) 성긴 매질에서 밴 매질로 파동이 전파할 때 굴절각은 반드시 입사각보다 작다.



문제: 물면파간섭실험기구를 제작하여보아라.

방법: · 소형직류전동기(완구용, 전기면도기용)를 준비한다.

· 쇠줄로써 물면에 잠그어야 할 짝지발을 만든다.

· 짝지발을 어떻게 전동기축과 련결하면 아래우로 진동하겠는가를 생각하고 결합하여라.

· 짝지발의 두끝을 물면에 담그고 진동시켜 물면의 간섭무늬를 관측한다.

복습문제

1. 길이가 20m인 배가 파도가 밀려오는 방향으로 마주서서 닻을 내리고있다. 파도에 의하여 배머리가 들렸다가 다시 들릴 때까지 걸리는 시간은 4.5s이고 배머리가 들린 때로부터 2.5s뒤에 배뒤부분이 들린다. 파도의 진동수, 파장, 전파속도는 얼마인가? (**답**. 0.22Hz, 36m, 8m/s)
2. 어떤 순간의 세로파의 파모양이 주어졌다.(그림 9-38)
   ㄱ) 이 순간에 매질알갱이들의 밴 곳과 성긴 곳을 찾아보아라.
   ㄴ) 점 O와 H사이에서의 매질알갱이들의 변위와 속도방향을 화살로 표시하여라.
   ㄷ) 속도가 0인 점과 최대인 점을 찾아보아라.

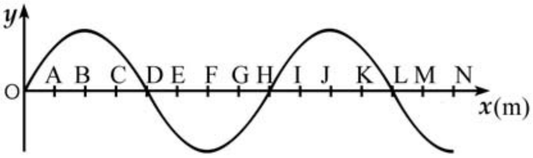


그림 9-38

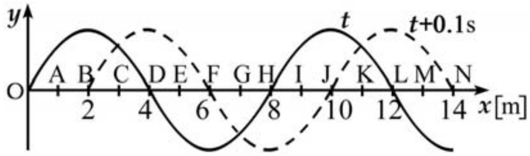


그림 9-39

3. t인 순간(실선)과 $t'=t+0.1\text{s}$ 인 순간(점선)의 파모양이 주어졌다.(그림 9-39) 다음 물음에 대답하여라.
   ㄱ) 파동의 전파방향, 전파속도 및 진동주기는 얼마인가?
   ㄴ) 0.5s동안의 자리각변화는 얼마인가?
   (**답**. ㄱ) x방향, 20m/s, 0.4s ㄴ) 2.5π)
4. t=0인 순간의 가로파의 파모양과 C점의 진동그라프가 그림 9-40과 같이 주어졌다.

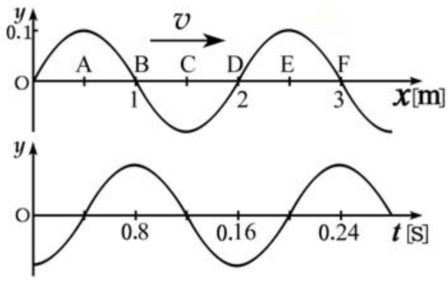


그림 9-40

   ㄱ) 파동의 식과 C점의 진동식을 세워보아라.
   ㄴ) 파동에 의하여 일어나는 진동의 최대속도와 최대가속도를 구하여라.
   ㄷ) t=0.1s인 때의 파모양을 그리고 진동속도와 가속도가 최대인 점들을 찾아보아라.
   (**답**. ㄱ) $y=0.1\sin\pi(1+12.5t-x)$, $y_C=0.1\sin\pi(12.5t-0.5)$[m]
   ㄴ) 3.9m/s, 154m/s^2
   ㄷ) 속도가 최대인 점 $x=k+0.25$, 가속도가 최대인 점 $x=k+0.75$[m], $k=0, 1, 2, \cdots$)
5. 파원의 진폭이 10cm, 진동수가 4Hz, 처음자리각이 0인 진동에서 2.4m/s의 속도로 퍼져나가는 파동식을 써보아라. 그리고 t=1.5s인 때의 파모양을 표시하는 식과 그라프, 파원으로부터 x=1.95m 떨어진 점의 진동식과 그라프를 그리여라.

(답. $y(x,\ t)=0.1\sin2\pi(4t-\frac{x}{0.6})$ [m], $y(x,\ 1.5)=0.1\sin2\pi(6-\frac{x}{0.6})$ [m],
$y(1.95,\ t)=0.1\sin2\pi(4t-3.25)$ [m])

6. 자리표원점($x=0$)에 놓여있는 점이 $y=0.1\sin0.5\pi t$[m]로 진동을 하고있다. 이 진동이 x축방향으로 $v=300$m/s의 속도로 전파되고있다.

ㄱ) 파동식을 구하여라.

ㄴ) 자리표원점으로부터 $x=600$m의 거리에 있는 점의 진동식을 표시하여라.

ㄷ) 진동이 시작된 후 $t=4$s 지난 순간의 파모양을 구하여라.

(답. ㄱ) $y(x,\ t)=0.1\sin\pi\left(0.5\ t-\frac{x}{600}\right)$ [m]

ㄴ) $y(600,\ t)=0.1\sin\pi(0.5t-1)$ [m]

ㄷ) $y(x,\ 4)=0.1\sin\pi\left(2-\frac{x}{600}\right)$ [m])

7. 점파원으로부터 퍼져나가는 구면파의 식이 $y=\frac{2\times10^{-4}}{r}\sin\pi(1\ 020t-3r)$이다. t는 s, y와 r는 m단위로 주어졌다. 파장과 전파속도, $r_1=1$m, $r_2=1.5$m인 점들에서 진폭과 두 점의 자리각차를 구하여라.

(답. 0.67m, 340m/s, $A_1=2\times10^{-4}$m, $A_2=1.33\times10^{-4}$m, $\triangle\varphi=1.5\pi$)

8. 한 직선우에서 서로 마주 퍼지는 두 평면파의 식이 다음과 같이 주어졌다. t는 s, y와 r는 m단위로 주어졌다.

$$y_1=5\times10^{-3}\sin4\pi(25t-x)$$
$$y_2=5\times10^{-3}\sin4\pi(25t+x)$$

ㄱ) 합성파의 식을 구하여라.

ㄴ) 합성파의 진폭의 최대값과 최소값은 얼마인가?

ㄷ) 합성파의 진폭이 최소로 되는 점(마디)들사이의 거리는 얼마인가?

(답. ㄱ) $y=0.01\cos4\pi x\cdot\sin100\pi t$[m]

ㄴ) 최대 0.01m, 최소 0

ㄷ) $0.25k$ [m], $k=1,\ 2,\cdots$)

9. 2개의 같은자리각으로 진동하는 간섭성파원으로부터 어떤 점까지의 거리가 각각 70cm, 40cm이다. 이 점으로부터 파원까지의 경로차가 반파장의 8배라면 파장은 얼마이며 간섭결과는 어떻게 되겠는가?

(답. 7.5cm, 극대)

10. 서로 반대자리각으로 떠는 두 파원 A, B가 14cm 떨어져있고 이 파원들로부터 파장이 4cm인 물면파가 퍼져나온다.

ㄱ) 간섭의 극대와 극소가 되는 자리들을 그림에 표시하여라.

ㄴ) 두 파원을 맺는 직선우에는 극대와 극소가 몇개씩 생기겠는가?

(답. ㄴ) 극대: 두 파원 A, B까지 포함하여 8개, 극소: 7개)

11. 그림 9-41과 같이 서로 6m 떨어진 수평면우의 두 점에서 완전히 같은 진동을 하는 파원 A, B가 파장이 2m인 파동을 일으킨다. 선분 AB우에서 정상파의 배가 몇개 생기겠는가? 그리고 선분 AB에 수직이고 B점으로부터 8m 떨어진 점 C는 어떤 진동상태에 있는가? (답. 7개, C점은 극대)

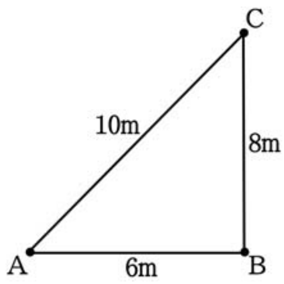


그림 9-41

12. 그림 9-42와 같은 소리간섭계에서는 음원에서 나온 소리가 A로 들어가 두 길로 갈라졌다가 다시 합쳐져 B로 나온다. 관 C는 드나들수 있는데 이에 따라 B에서 나오는 소리가 커졌다작아졌다한다. B에서 나오는 소리가 거의 들리지 않는 상태에서 C를 20cm씩 더 빼낼 때마다 소리가 다시 들리지 않군 한다. 음원에서 나는 소리의 진동수는 얼마인가? 소리의 속도는 340m/s이다. (답. 850Hz)

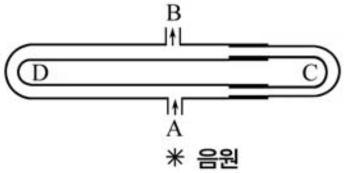


그림 9-42

13. 그림 9-43과 같이 한 발진기에 이은 두개의 작은 고성기 S_1, S_2이 0.4m 떨어져있으면서 소리를 낸다. S_1, S_2에 평행되게 움직이면서 소리를 들으면 O점으로부터 멀어짐에 따라 소리가 약해지다가 다시 세져서 A점에서 가장 세다. OA=0.7m이고 소리속도가 340m/s라면 발진기에서 일어나는 소리의 진동수는 얼마인가? (답. 1.7kHz)

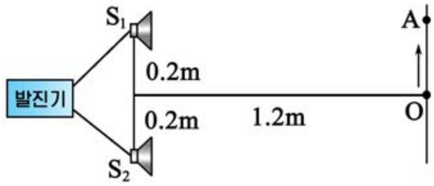


그림 9-43

14. 그림 9-44와 같은 파모양을 가진 시누스파가 x방향으로 퍼지다가 O점으로부터 10m 되는 곳에 있는 x축에 수직인 면으로부터 반사된다. 다음과 같은 경우 O점과 반사면을 포함하여 몇개의 마디와 배가 있는 정상파가 생기겠는가?

ㄱ) 파동이 더 밴 매질을 만나 반사될 때

ㄴ) 파동이 더 성긴 매질을 만나 반사될 때

(답. ㄱ) 마디 11개, 배 10개
ㄴ) 마디 10개, 배 11개)

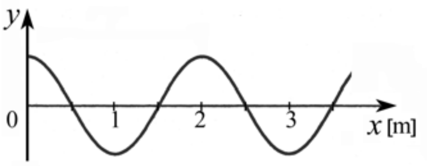


그림 9-44

15. 깊이가 물면파의 파장보다 작은 물에서는 물면파의 속도가 물깊이의 1/2제곱에 비례한다. 넓은 그릇에 물을 붓고 그릇의 절반부분에 두께가 물깊이의 1/2인 유리판을 잠그었다. 깊은쪽에서 얕은쪽으로 경계선에 45° 되는 방향으로 물면파가 입사하면 굴절파는 어떤 방향으로 나가겠는가?(그림 9-45) (답. 30°)

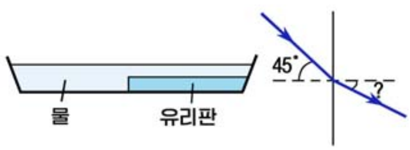


그림 9-45
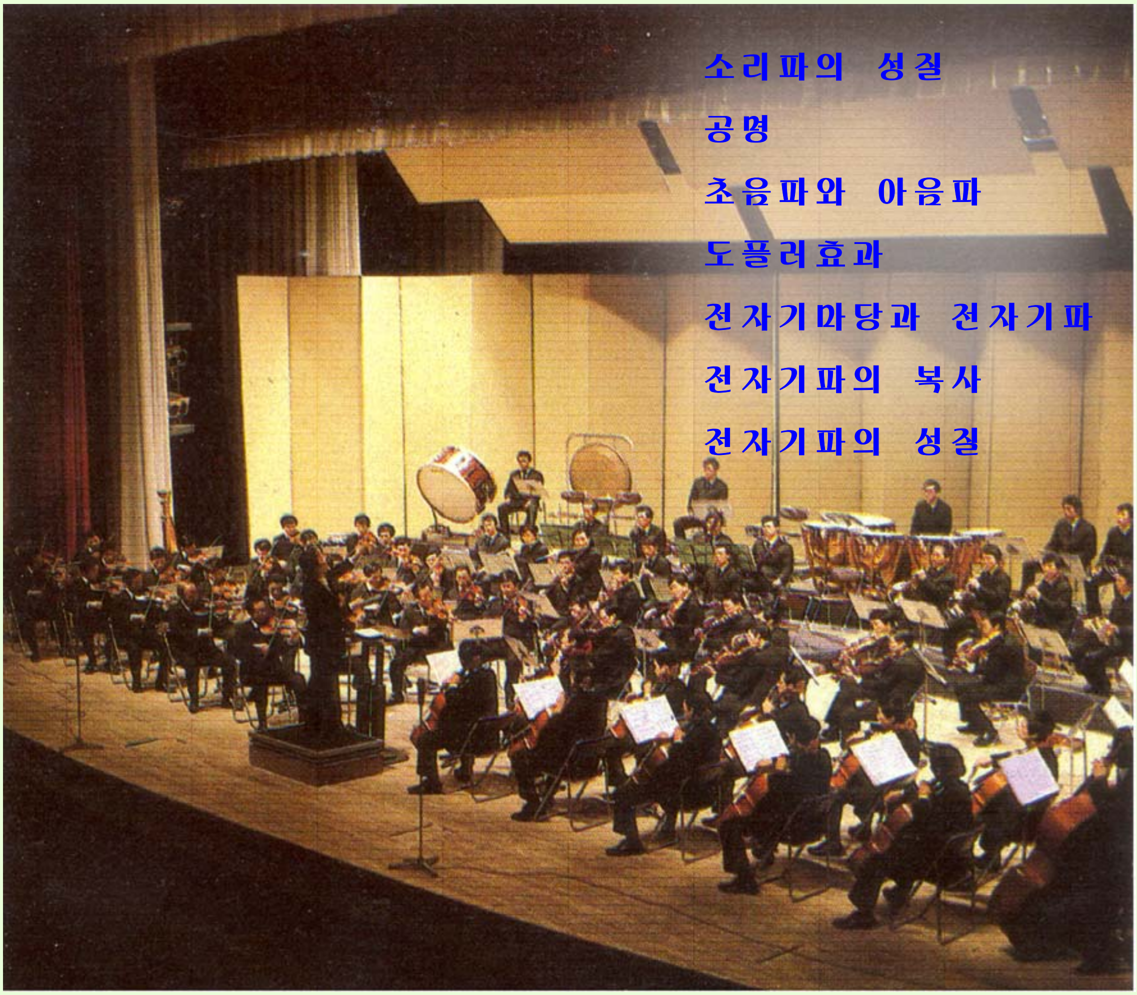
제 10 장. 소리파, 전자기파

파동에는 물면파나 줄에서의 파동과 같이 직접 눈으로 볼수 있는 파동이 있는가 하면 소리나 전자기파와 같이 눈으로 볼수 없는 파동도 있다.

우리는 사람들의 말소리, 노래소리, 악기소리, 자동차소리 등 여러가지 소리를 듣고있으며 소리를 통하여 수많은 정보를 받아들이고있다.

또한 전자기파가 나르는 신호를 받아 집에 앉아서도 영화나 우리 나라와 세계 여러 나라에서의 새 소식 등을 보고 들으며 전자기파를 리용하여 멀리 떨어진 기계도 조종하고있다.

이 장에서는 소리파와 전자기파의 발생과 성질에 대하여 학습한다.



제 1 절. 소리파의 성질

소 리 파

고무마치로 음차를 때리면 소리를 들을수 있다. 각종 관악기들은 공기기둥의 진동에 의하여 소리를 낸다. 바이올린이나 기타와 같은 현악기의 줄을 튕기면 줄이 진동하면서 소리가 난다.(그림 10-1)



그림 10-1. 소리의 발생

진동하면서 소리를 내는 물체를 **음원**이라고 부른다.

소리는 어떻게 전파되는가.

악기줄을 튕기거나 고성기의 진동종이가 진동하면 그 가까이의 공기가 배졌다성글어졌다하면서 진동한다.

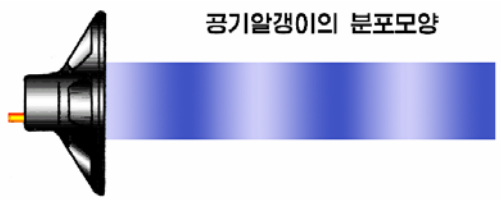


그림 10-2. 공기속에서 소리의 전파

배진 부분의 공기는 압력이 커서 둘레의 공기를 밀고 성글어진 부분의 공기는 압력이 작아 둘레의 공기를 당긴다. 이에 따라 공기의 밀도가 주기적으로 변하면서 진동이 이웃부분에로 전달되여간다.(그림 10-2)

소리는 진공속에서는 퍼지지 못하고 고체, 액체, 기체 등 튐성매질속에서 퍼지는 튐성파이다.

튐성매질속에서 퍼지는 진폭이 작은 세로파를 **소리파**라고 부른다. 진동수가 16~20 000Hz인 소리파가 귀에 들어오면 압력의 주기적인 변화에 의하여 고막이 진동하여 듣는 감각이 일어난다. 이러한 소리파를 보통 **소리**라고 부른다.

진동수가 대단히 작거나 크면 듣는 감각을 일으키지 못한다.

진동수가 16Hz이하인 소리파를 **아음파**, 20 000Hz이상인 소리파를 **초음파**라고 부른다.

소리의 세 요소

소리의 높이, 크기, 음색(소리색갈)의 세 요소를 **소리의 세 요소**라고 부른다.

소리의 높이는 진동수에 관계된다.(그림 10-3)

소리의 높이가 진동수에 관계된다고 하여 높이가 진동수에 비례하는것은 아니다. 즉 진동수가 2배 커졌다고 하여 소리가 2배 높아지는것이 아니다. 소리의 높이는 진동수의 로그에 비례한다.

$$h \sim \lg \nu \qquad (1)$$

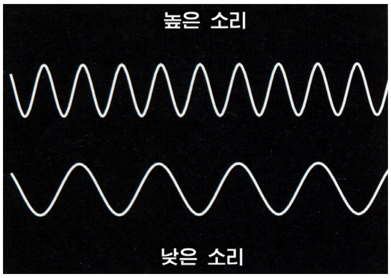


그림 10-3. 소리의 높이와 진동수

소리의 크기는 진폭에 관계된다.(그림 10-4)

북을 약하게 칠 때와 세게 칠 때 우리의 귀에 작용하는 듣는 감각이 서로 다르다. 기타의 같은 줄을 세게 튕길 때와 약하게 튕길 때도 마찬가지이다. 소리의 크기는 귀에 작용하는 소리의 세기에 관계된다.

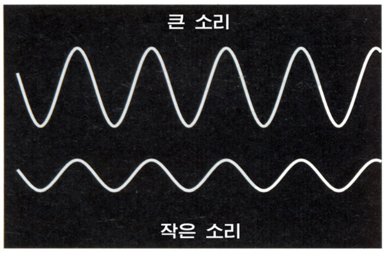


그림 10-4. 소리의 크기와 진폭

전파방향에 수직인 단위면적을 통하여 단위시간동안에 전달되는 파동의 에네르기를 **파동(소리파)의 세기**라고 부른다.

소리파의 파면이 v의 속도로 t만 한 시간동안에 전파방향에 수직인 면적 S를 통하여 이동하였다면 이 구간에서 파동의 에네르기는

$$E = 2\pi^2 \rho S v t \nu^2 A^2 \qquad (2)$$

으로 되며 단위시간동안에 전송되는 평균에네르기 즉 파원의 출력은

$$P = \frac{E}{t} = 2\pi^2 \rho S v \nu^2 A^2 \qquad (3)$$

으로 된다. 따라서 파동(소리파)의 세기는 다음과 같다.

$$I = \frac{P}{S} = 2\pi^2 \rho v \nu^2 A^2 \quad \text{파동(소리파)의 세기} \qquad (4)$$

파동의 세기의 단위는 $1\mathrm{W/m^2}$이다. $1\mathrm{W/m^2}$는 파동의 전파방향에 수직인 면 $1\mathrm{m^2}$에 해당한 파원의 출력이 1W라는것을 의미한다.

주어진 진동수의 소리는 진폭이 클수록 크게 들린다. 그러나 소리의 크기는 세기에 비례하지 않고 세기의 로그로 표시되는 세기준위에 비례한다.

진동수 1kHz의 소리에 대한 소리파의 세기 $I_0 = 10^{-12}\mathrm{W/m^2}$에 대응하는 소리의 크기를 기준으로 잡고 그와 진동수가 같고 세기가 I인 소리의 크기를 평가하는 량을 **소리의 세기준위**라고 부른다.

$$L=10\ell g\frac{I}{I_0} \quad \text{소리의 세기준위} \tag{5}$$

소리의 세기준위의 단위는 1dB(**데시벨**)이다.

사람의 귀는 일정한 세기의 소리만을 느낀다. 즉 소리의 세기가 너무 작으면 들리지 않고 너무 크면 귀에 아픈 감각만을 주며 소리로 들리지 않는다.

사람의 귀는 1~3kHz의 진동수에 대하여 제일 잘 느낀다. 귀느낌아래한계는 10^{-12}W/m²이며 귀느낌웃한계는 10^2W/m²인데 그 이상이면 이런 세기의 소리는 귀에 아픈감을 주며 들리지 않는다.

소리색갈(음색)은 음원의 진동특성에 관계되는 소리의 성질이다.

소리의 높이와 크기가 같아도 음원의 종류가 다를 때 그 소리들을 구별할수 있는것은 음원마다 자기의 고유한 진동특성을 가지고있기때문이다.

실례로 눈으로 보지 않고 듣기만 하여도 말하는 사람이 누구이며 악기소리가 어떤 악기에서 나는 소리인가 하는것을 가려내는것은 사람마다 또 악기마다 자기의 고유한 음색을 가지고있기때문이다.

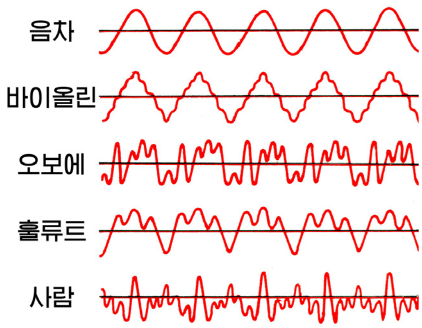


그림 10-5. 파모양

음색은 음원이 내는 소리의 구체적인 파모양에 관계된다.(그림 10-5)

음원에서는 기본진동수의 소리(기본음)에 배진동수의 소리(배음)들이 섞이여 나온다. 음원의 구조에 따라 배진동수들의 소리들이 섞이는 비률이 달라서 음원마다 내는 소리가 다르게 들린다.

소리파의 성질

소리파는 매질의 튐성이 클수록 큰 속도로 전파되며 밀도가 클수록 관성이 커서 더 천천히 전파된다.

참고 악음과 소음

하나의 진동수의 소리를 **순음**이라고 부른다.

하나의 기본진동수와 몇개의 배진동수를 가지며 높이와 음색이 뚜렷한 소리를 **악음**이라고 부른다. 악음은 몇개의 순음으로 되여있다. 여러가지 악기소리, 사람들의 말소리가 여기에 속한다.

무수히 많은 진동수의 소리가 섞여있는 소리를 **소음**이라고 부른다. 파도소리, 나무잎이 설레이는 소리, 폭발소리 등은 소음에 속한다.

공기속에서 소리의 전파속도는 공기의 온도 t에 다음과 같이 관계된다.

$$v = 331.5 + 0.6\,t\ [\mathrm{m/s}]$$ **공기속에서 소리의 전파속도** (6)

소리가 공기속에서 전파되다가 장애물을 만나면 일부는 흡수되고 일부는 반사되여 되돌아온다.(그림 10-6)



그림 10-6. 메아리현상

사람의 귀는 시간간격이 $\frac{1}{15}$s이상인 같은 두 소리를 갈라서 듣는다.

극장이나 영화관에서는 벽체들에서 반사되는 소리들을 잘 조절하여 모든 자리에서 사람들의 소리를 잘 듣도록 한다.

소리가 굴절된다는것은 밤에 멀리서 울리는 기적소리나 시간을 알리는 종소리가 잘 들려오는것을 통하여 알수 있다.

소리가 파동의 일종이라는것은 간섭과 에돌이를 통해서도 알수 있다.

그림 10-7의 ㄱ와 같이 적당히 떨어져있는 두 고성기를 같은 진동수의 소리를 내게 하고 그앞을 지나가보면 소리가 크게 들리는 곳과 작게 들리는 곳이 있다.

또한 음차를 진동시키고 그 주위를 한바퀴 돌아보면 크게 들리는 곳과 작게 들리는 곳이 있다.(그림 10-7의 ㄴ)

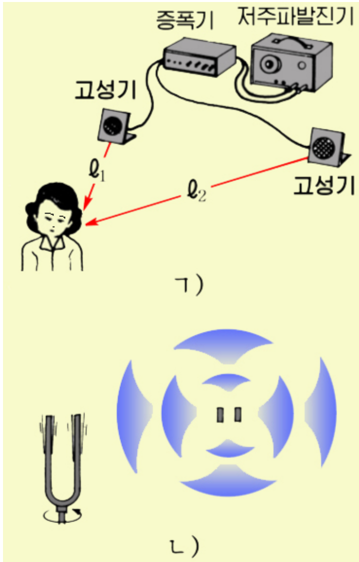


그림 10-7. 소리의 간섭

이것은 소리파에서 간섭현상이 일어난다는것을 보여준다.

소리파는 파장이 수십cm~수십m로서 매우 길기때문에 장애물이나 틈이 비교적 커도 에돌이현상이 잘 나타난다.(그림 10-8)



그림 10-8. 소리의 에돌이

생각하기 낮에는 땅면에서 우로 올라갈수록 온도가 낮아지고 밤에는 땅으로 내려올수록 온도가 낮아지는것을 리용하여 낮에 소리가 잘 들리지 않고 밤에 소리가 잘 들리는 현상을 그림 10-9를 보면서 생각해보아라.

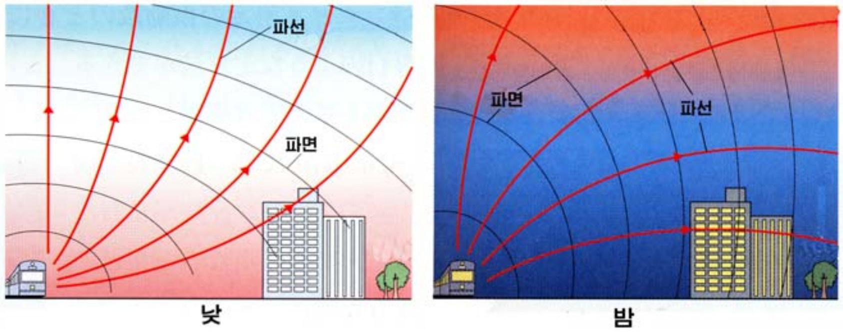


그림 10-9. 공기속에서 소리의 굴절

문 제

1. 기온이 25℃인 대기속에서 소리의 파장범위와 《라》음의 파장을 구하여라. 《라》음의 진동수는 440Hz이다.
2. 구면파가 퍼질 때 진폭은 파원으로부터의 거리에 거꿀비례한다. 종소리를 10m 밖에서 들을 때 세기준위가 70dB이라면 100m 밖에서 들을 때에는 세기준위가 몇dB이겠는가?
3. 다음 글에서 틀린것을 찾고 그 근거를 밝히여라.
   ㄱ) 높은 소리일수록 반드시 파장이 짧다.
   ㄴ) 진동수가 큰 소리는 반드시 크게 들린다.
   ㄷ) 소리의 크기는 소리파의 세기에 비례한다.
   ㄹ) 《아》와 《이》는 소리색갈이 다른 소리이다.
   ㅁ) 공기속에서 소리의 전파속도는 물속에서보다 빠르다.
4. 수소기체에서 소리속도는 공기속에서보다 빠른가 뜬가? 그 리유는 무엇인가?

제2절. 공 명

공 명

바이올린이나 기타, 가야금의 줄을 튕기면 선이 진동하면서 울림통도 껴울린다.

실 험

○ 그림 10-10과 같이 진동수가 서로 다른 두 음차를 그의 울림통의 열린쪽이 마주 향하도록 놓고 그가운데 하나를 때려 울리도록 한다. 다른 음차는 울리지 않는다.

○ 다음에는 진동수가 같은 두개의 음차를 가지고 우와 같은 실험을 해본다. 다른 음차도 함께 울린다.

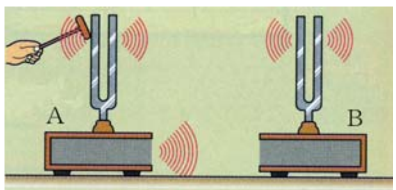


그림 10-10. 음차의 공명

이런 현상은 왜 일어나는가.

한 음차가 진동하면 그와 이어진 울림통이 울리면서 소리가 생겨 울림통밖으로 전파되여나간다. 이 소리는 옆에 있는 울림통에 강제진동을 일으킨다. 이때 이것과 이어진 음차의 고유진동수가 넘겨받는 소리의 진동수와 같으면 공진되면서 음차가 소리를 낸다.

이처럼 소리를 내는 물체에 그의 고유진동수와 같은 진동수의 소리파가 작용할 때 껴울리는 현상을 **공명**이라고 부른다.

바이올린이나 기타, 가야금 같은데서 줄만 진동해서는 은은하고 긴 여운을 남기는 소리가 나지 않는다.

악기들에는 공명을 일으켜 소리를 크게, 부드럽게 하는 공명통이 있다.

줄의 고유진동수

두끝이 고정된 줄을 튕기면 줄의 고유진동에 의하여 고유진동수의 소리가 난다.

앞에서 보았지만 두끝을 고정한 줄을 튕기면 줄을 따라 퍼지던 파동이 량끝에서 반사하면서 정상파가 생긴다.(그림 10-11) 이때의 파장은

$$\lambda_n = \frac{2}{n}\ell \quad (n = 1,\ 2, \cdots)$$

으로 된다. 따라서 진동수는

$$\nu_n = \frac{v}{2\ell} n \quad (n = 1,\ 2, \cdots) \qquad (1)$$

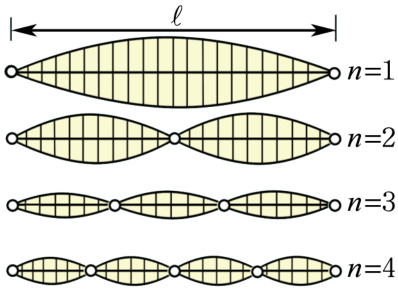


그림 10-11. 줄의 고유진동

이다. 이 식이 바로 줄의 고유진동수를 결정하는 식이다.

어떤 방법으로 소리를 변화시키겠는가.

실험

○ 그림 10-12와 같은 줄의 진동실험기구에서 줄의 길이 ℓ과 장력 T를 변화시키면서 줄을 튕겨본다.

○ 굵기가 다른 줄로 같은 실험을 한다.

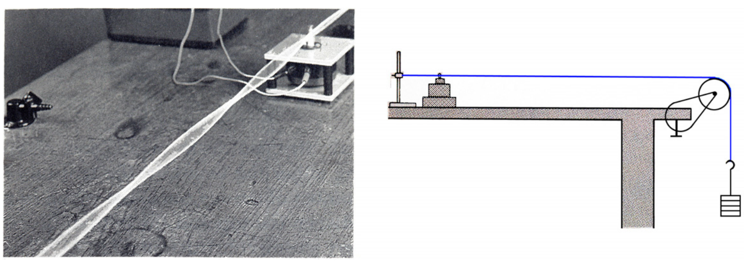


그림 10-12. 줄의 고유진동실험기구

줄의 굵기, 길이, 장력의 변화에 따라 소리가 달라진다.

선밀도(단위길이당 질량)가 ρ인 줄을 장력 T로 당겼을 때 줄에서의 파동의 속도는 다음과 같다.

$$v=\sqrt{\frac{T}{\rho}} \tag{2}$$

이것을 식 1에 넣으면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\nu_n=\frac{n}{2\ell}\sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad \text{줄의 고유진동수} \tag{3}$$

줄의 고유진동수는 장력의 1/2제곱에 비례하고 길이에는 거꿀비례하며 선밀도의 1/2제곱에도 거꿀비례한다.

기본진동(n=1)에 의하여 나는 소리를 **기본음**, 배진동(n=2, 3,…)에 의하여 나는 소리들을 **배음**이라고 부른다.

악기에서 나는 소리의 높이는 기본음의 진동수에 의하여 규정되며 배음들의 세기비에 의하여 소리색갈이 결정된다.

공기기둥의 공명

좁은 관을 불거나 관에 난 구멍으로 공기가 스쳐지나게 하면 관속의 공기가 압축되였다불어났다하면서 세로파가 생기고 이것이 관속을 오고가면서 정상파를 이룬다. 이때 막힌 끝에는 마디가 놓이고 열린 끝에는 배가 놓인다.

이러한 진동이 공기기둥의 고유진동이다. 관악기소리는 공기기둥의 고유진동에 의하여 생긴다.

고유진동이 일어나고있는 관속에는 반파장이 다음과 같이 들어있다.

한 끝만 열린 관에서(그림 10-13)

$$\ell=\left(n-\frac{1}{2}\right)\frac{\lambda_n}{2} \quad (n=1,\ 2,\cdots)$$

두끝이 다 열린 관에서(그림 10-14)

$$\ell=n\frac{\lambda_n}{2} \quad (n=1,\ 2,\cdots)$$

공기기둥속에서 소리속도가 v라면 파장 λ와 고유진동수 ν는 다음과 같이 결정된다.

$$\lambda_n=\frac{4\ell}{(2n-1)},\quad \nu_n=\frac{(2n-1)v}{4\ell} \quad \text{한끝만 열린 관} \tag{4}$$

$$\lambda_n=\frac{2\ell}{n},\quad \nu_n=\frac{nv}{2\ell} \quad \text{두끝이 다 열린 관} \tag{5}$$

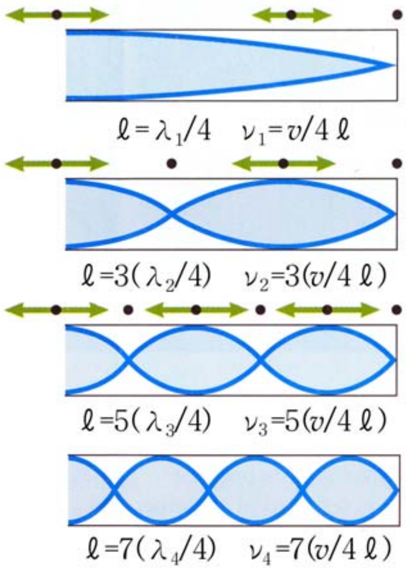


그림 10-13. 한끝만 열린 관에서 공기기둥의 고유진동

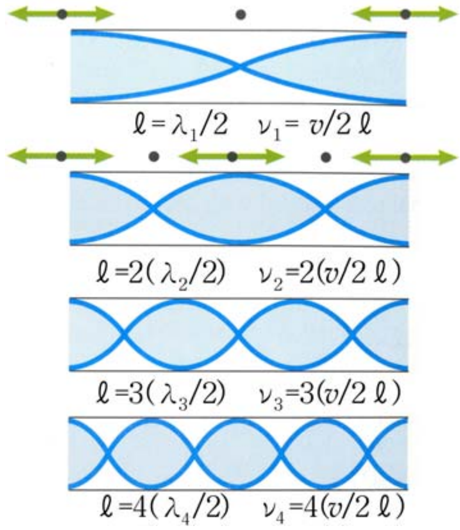


그림 10-14. 두끝이 열린 관에서 공기기둥의 고유진동

공명현상을 리용하여 공기속에서의 소리의 파장과 속도를 잴수 있다.

생각하기 그림 10-15를 보면서 공명현상을 리용하여 공기속에서의 소리의 파장을 재는 원리를 생각해보아라.

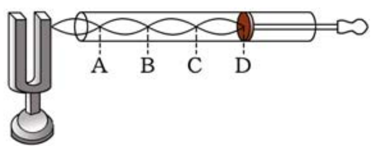


그림 10-15. 공기기둥의 공명실험

문 제

1. 그림 10-12와 같은 장치가까이에 고성기를 잇고 12kg의 추를 달았을 때 2개의 배가 있는 정상파가 생겼다. 줄을 진동시키면 음원의 진동수는 얼마인가? 줄의 길이는 0.5m이고 질량은 3g이다.
2. 줄을 당겨 길이가 80cm 되게 두끝을 고정하고 튕기면 《쏠》음이 난다. 장력을 그대로 하면서 줄의 길이를 얼마씩 되게 하면 《도》와 《미》음이 나겠는가? 《도》, 《미》, 《쏠》음의 진동수는 각각 262Hz, 330Hz, 392Hz이다.
3. 공기기둥의 길이가 12.5cm인 한끝이 막힌 관의 기본음의 파장과 진동수는 얼마인가? 같은 길이의 두끝이 다 열린 관의 기본음의 파장과 진동수는 얼마인가? 소리의 속도는 340m/s이다.

제 3 절. 초음파와 아음파

초 음 파

초음파는 그 특수한 성질로 하여 수산업과 기계공업, 화학공업 등 인민경제 여러 분야와 의료부문들에서 널리 리용되고있으며 그 전망도 매우 크다.

초음파는 진동수가 20 000Hz를 넘는 소리파로서 사람은 듣지 못하지만 일부 새나 개, 고래, 곱등어, 박쥐 등 동물들이 들을수 있다.(그림 10-16)

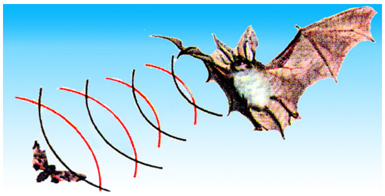


그림 10-16. 박쥐의 먹이사냥방법

초음파는 어떤 성질을 가지며 어떻게 리용하는가.

초음파는 파장이 짧기때문에 에돌이능력이 약하고 곧추 나간다.

즉 초음파는 곧추 나가는 성질이 강하며 다른 물질의 경계에서 잘 반사된다.

초음파는 그의 세기가 매우 크다. 초음파는 진동수가 매우 크기때문에 진폭이 그다지 크지 않아도 그의 세기($I = 2\pi^2 \rho \nu^2 v A^2$)는 대단히 큰 값을 가질수 있다.

그러므로 초음파의 지향성을 리용하여 바다의 깊이를 재거나(그림 10-17의 ㄱ) 물고기떼를 찾고(그림 10-17의 ㄴ) 물속에서 통신을 보장한다. 초음파를 내보내여 물고기떼에서 반사되여오는 파를 잡아 되돌아오는데 걸린 시간, 초음파의 세기와 방향을 재면 물고기떼의 크기와 자리를 알아낼수 있다.(초음파어군탐지기)

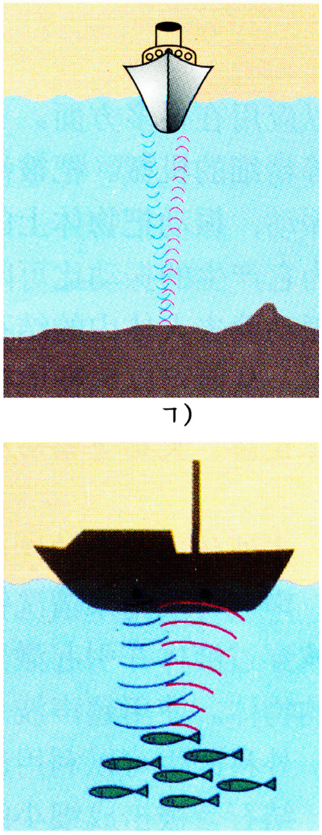


그림 10-17. 바다의 깊이와 물고기떼까지의 거리를 측정한다

초음파는 공기속에서보다 액체나 특히 고체속에서 흡수되지 않고 더 잘 전파된다.(투과능력) 초음파의 투과능력과 반사를 리용하여 금속내부의 흠집이나 콩크리트구조물, 가소물제품 및 저수지의 뚝내부의 흠집을 찾아내는 초음파결함탐지기도 만들수 있다.

초음파는 공동효과를 일으킨다. 세로파인 초음파가 액체속으로 퍼질 때 매질의 주기적인 압축, 팽창이 빨리 일어나므로 압력변화가 심하다. 압력이 낮아지는 동안에는 액체가 성긴 곳으로 액체속에 있던 기체가 몰려들어 기포가 생기고 그속으로 수증기가 들어간다. 그다음 압력이 높아지는 동안에는 그 기포들이 압축되는데 그

과정이 매우 짧은 시간동안에 일어나므로 온도가 급격히 올라가고 압력도 수백MPa로 되여 기포들이 순식간에 파괴되면서 충격파가 생긴다.

이렇게 초음파가 액체속으로 퍼질 때 온도와 압력 등 여러가지 특성량들의 급격한 변화가 함께 일어난다. 이 현상을 **초음파공동현상**이라고 부른다.

이 현상에 의하여 초음파가 퍼지는 액체속에 들어있는 다른 액체의 방울이나 고체알갱이들의 겉면이 쉽게 파괴되여 액체속에 잘 섞인다. 실례로 보통때 섞이지 않는 물과 기름도 초음파의 작용으로 섞을수 있으며(유탁액) 액체에 고체가루를 섞을수 있다.(현탁액) 또한 초음파공동현상은 제품에 묻은 기름때나 산화막 같은것을 깨끗이 씻어내며 물감알갱이들을 작게 부스러뜨려주어 천에 물감이 잘 들게도 한다.

초음파는 그의 세기가 매우 크므로 유리, 수정, 규소와 같은 굳고 부스러지기 쉬운 물체를 가공하는데 리용한다.(그림 10-18) 초음파의 작용으로 큰 진동가속도를 얻은 돌가루들은 가공대상의 겉면에 센 충격을 주어 뜯어낸다.

초음파는 또한 의료분야에서 복부초음파진단기로 병을 진단하는데 리용되며 세균과 같은 생물체를 쉽게 죽일수도 있다. 약한 초음파는 사람들의 신진대사를 촉진하는 작용이 있어서 병치료에 매우 효과적이다.

초음파는 산화되기 쉬운 재료(례하면 알루미니움)들의 땜에도 리용할수 있다. 보통조건에서 알루미니움용접이 잘 안되는것은 그 겉면에 산화알루미니움막이 생기기때문이다. 때문에 20kHz 정도의 초음파진동을 주어 피막을 벗기는 순간에 땜하도록 하는 방법이 널리 쓰이고있다.

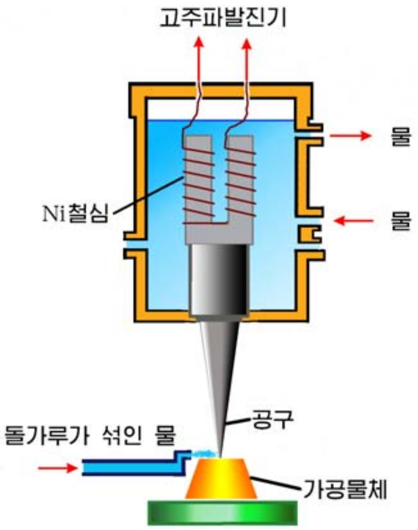


그림 10-18. 초음파가공의 원리

아음파

아음파는 사람의 귀로 들을수 없는 작은 진동수(16Hz이하)를 가진 소리파이다.

아음파는 지진, 우뢰, 방전 등으로 자연계에서 생겨나며 폭발에 의해 발생시킬수도 있다.

아음파는 보통 들리는 잡음과 함께 자주 일어나므로 개별적으로 수감하기 힘들때가 많다.

아음파의 본질적인 특성은 파장이 길기때문에 에돌이능력이 강하며 따라서 흡수가 작은것이다. 그러므로 아음파는 발생하면 먼곳까지 전파되므로 먼곳에서 일어난 지진이나 폭발을 탐지할수 있다.

아음파는 인체의 기능에 여러가지 측면에서 부정적영향을 미친다. 사람의 고유진동수는 서있을 때 5~12Hz, 누워있을 때 3~4Hz이며 가슴근육의 고유진동수는 5~8Hz로 보고있다. 그러므로 이러한 대역의 아음파는 세기에 따라 차이나지만 신체에 작용하면 공진효과를 일으키면서 인체에 커다란 피해를 줄수 있다. 이러한 원리를 리용하여 아음파무기(아음파발생장치)를 만들어 유생력량을 소멸할수 있다.

[례제] 어군탐지기로 바다속에 진동수가 80kHz인 초음파를 보냈더니 0.5s 지나서 신호가 돌아왔다. 고기떼까지의 거리를 구하여라. 물속에서 소리파의 전파속도는 약 1 500m/s이다.

풀이. 주어진것: t=0.5s

v=1 500m/s

구하는것: S?

$$S=\frac{1}{2}vt=\frac{1}{2}\times1\,500\times0.5=375(\text{m})$$

답. 375m

참고 충격파

폭발이나 분사식비행기관의 가스분출 그리고 총탄, 폭탄, 초음속비행기가 운동할 때는 매우 높은 압력과 밀도의 변화가 생겨 소리속도보다 더 빠른 속도로 퍼져나간다.

압력, 밀도 등 물리적량들의 불련속적인 변화가 소리속도보다 더 큰 속도로 퍼져나가는 과정을 **충격파**라고 부른다.

충격파는 모든 튐성매질속에서 형성되여 전파된다. 장약이 폭발할 때, 기체속으로 물체가 초음속으로 운동할 때 그리고 전기불꽃방전(례하면 번개와 벼락)이 일어날 때도 생긴다.

충격파는 에네르기를 전파한다는 점에서는 소리파와 공통점을 가지지만 본질적인 차이점을 가진다. 소리파가 전파할 때에는 매질알갱이들이 퍼져나가지 않지만 충격파의 전파과정에는 매질의 흐름이 뒤따른다.

충격파는 국방분야와 인민경제 여러 부문에서 널리 리용되고있다.

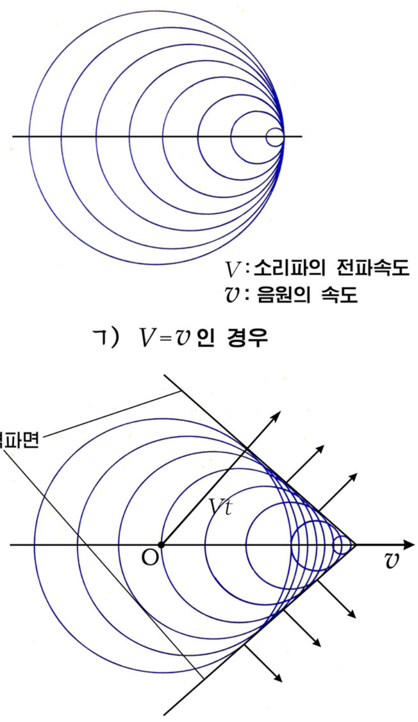


그림 10-19. 초음속으로 운동하는 물체앞뒤의 충격파전선

문 제

1. 바다물(소리속도 1 530m/s)속으로 초음파를 내보냈더니 고기떼에서 반사하여 0.35s로부터 0.42s사이에 반사파가 관측되였다. 고기떼까지의 거리와 고기떼의 두께는 얼마인가?
2. ν=100kHz, $A=10^{-6}$m인 초음파가 물($\rho=10^3$kg/m^3, v=1 450m/s)속에서 퍼질 때 파동의 세기, 매질알갱이들의 진동속도와 가속도의 최대값은 얼마인가?
3. 초음파로 금속에 있는 작은 흠집을 찾아내려면 파장이 매우 짧은 초음파를 써야 한다. 그 리유를 말하여라.

제 4 절. 도플러효과

방송차나 구급차가 소리를 내면서 지나갈 때 그 소리가 높아지거나 낮아지는것을 느낄수 있다.(그림 10-20) 일반적으로 파원과 관측자가 서로 가까와지거나 멀어질 때에는 파원이 내는 파동의 진동수와는 다른 진동수가 관측된다. 이런 현상을 **도플러효과(진동수변화효과)**라고 부른다.

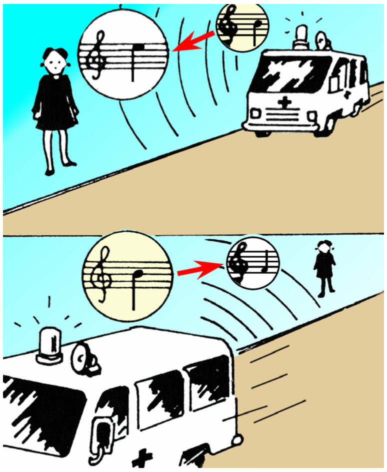


그림 10-20. 음원이 다가오거나 멀어질 때 소리의 높이변화

파원이 운동할 때의 파장변화

파원이 v_S의 속도로 운동하면서 진동수가 ν_0인 파동을 V의 속도로 내보낸다고 하자.

t=0인 순간에 파원이 S점에서 내보낸 파동은 t시간후에 반경이 Vt인 구면에 이른다. 파원은 이사이에 $\nu_0 t$개의 마루를 내보내면서 $v_S t$만큼 이동하여 S′점으로 간다.(그림 10-21)

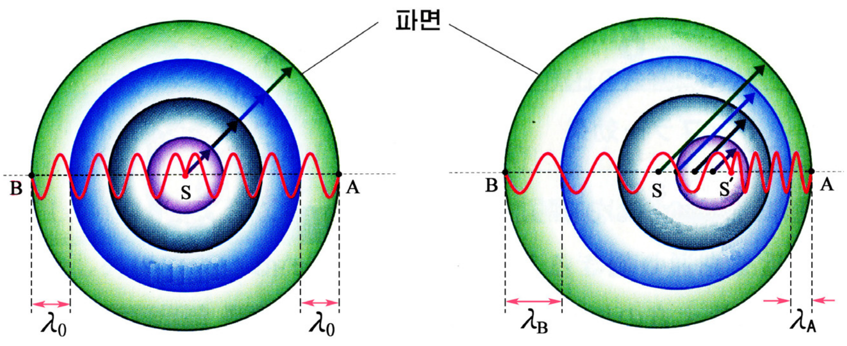


그림 10-21. 파원이 움직일 때 파면

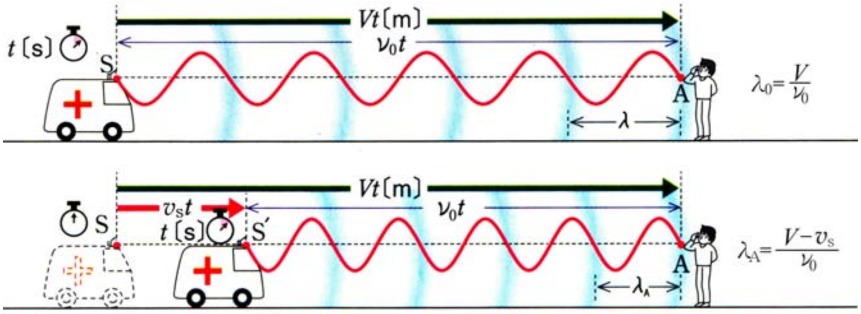


그림 10-22. 파원이 움직일 때 파장변화

이때 파원앞에서는 파면들이 배여져 파장이 짧아지고 파원뒤에서는 파면들이 성글어져 파장이 길어진다. t순간에 파원과 점 A, B사이의 거리는 각각 $(V-v_S)t$와 $(V+v_S)t$이며 따라서 파원앞뒤에서 파장은 다음과 같이 된다.(그림 10-22)

$$\lambda_A=\frac{V-v_S}{\nu_0},\quad \lambda_B=\frac{V+v_S}{\nu_0}$$

v_S의 부호를 다음과 같이 정한다.

V와 v_S의 방향이 같을 때(A점에서 관측할 때)는 $v_S>0$, 반대인 경우(B점에서 관측할 때)에는 $v_S<0$으로 된다. 그러면 운동하는 파원에서 나오는 파동의 파장은 다음과 같은 한개의 식으로 표시된다.

$$\lambda=\frac{V-v_S}{\nu_0}\quad \text{파원이 운동할 때 관측되는 파장} \qquad (1)$$

식 1에서 보는것처럼 파원이 운동할 때에는 관측자에 관계없이 파동의 전파속도 V와 파원의 이동속도 v_S가 같은 방향일 때는 파장이 짧아지고 반대방향일 때는 파장이 길어진다.

이런 현상은 여러가지 파동에서 다 일어난다.(그림 10-23)

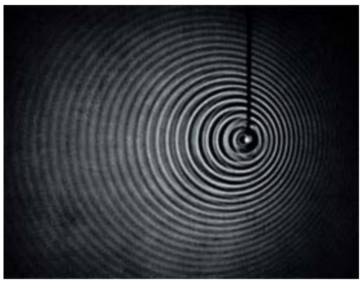


그림 10-23. 물면파에서 파장변화

관측자가 운동할 때의 진동수 변화

관측자가 v_0의 속도로 운동하면서 파장이 λ인 파동을 관측한다고 하자. 파원은 멎어있고 파동의 전파속도는 V이다. 관측자가 O점에 있다면 1s동안에 V/λ개의 마루가 관측자를 지나갈것이다. 그러나 파동을 따라가면서 관측한다면 $(V-v_0)$만 한 구간에 있는 마루만이 1s동안에 관측자를 지나게 된다.(그림 10-24)

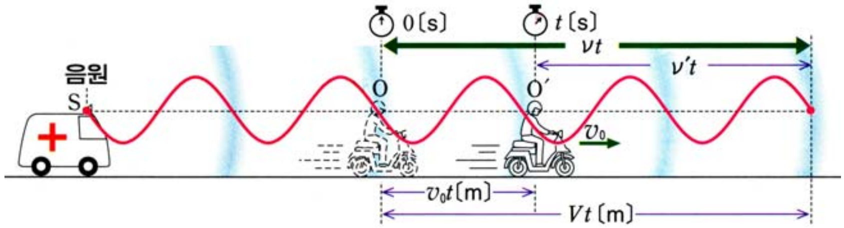


그림 10-24. 관측자가 운동할 때 관측되는 진동수

그러므로 파동의 전파방향으로 움직이면서 관측할 때 관측되는 진동수는

$$\nu'=\frac{V-v_0}{\lambda}$$

이며 관측자가 파동의 전파방향과 반대로 움직이는 경우에는 단위시간당 관측자를 지나는 파동의 마루개수가 관측자의 속도 v_0이 커짐에 따라 더 증가하므로 관측되는 진동수는 다음과 같다.

$$\nu''=\frac{V+v_0}{\lambda}$$

역시 v_0의 부호를 V의 방향을 기준으로 하여 정하면 우의 두 식을 하나의 식으로 쓸수 있다.

$$\nu=\frac{V-v_0}{\lambda} \quad \text{관측자가 운동하면서 관측되는 진동수} \qquad (2)$$

파원과 관측자가 둘다 움직일 때 진동수변화

파원으로부터 멀어질 때와 가까와질 때 관측되는 진동수는 어떻게 변화되는가.

식 2의 λ대신 식 1을 넣으면 파원이 v_S라는 속도로, 관측자가 v_0이라는 속도로 움직일 때 파원이 내보내는 파동의 진동수 ν_0과 관측되는 진동수 ν사이의 관계식이 얻어진다.

$$\nu=\frac{V-v_0}{V-v_S}\nu_0 \quad \text{파원과 관측자가 같이 움직일 때 진동수변화} \qquad (3)$$

여기서 v_0과 v_S는 파동이 퍼지는 방향을 기준으로 부호를 정한다. 즉 관측자나 파원이 파동의 전파방향으로 움직일 때 +, 파동의 전파방향과 반대로 움직일 때 -로 한다.(그림 10-25)

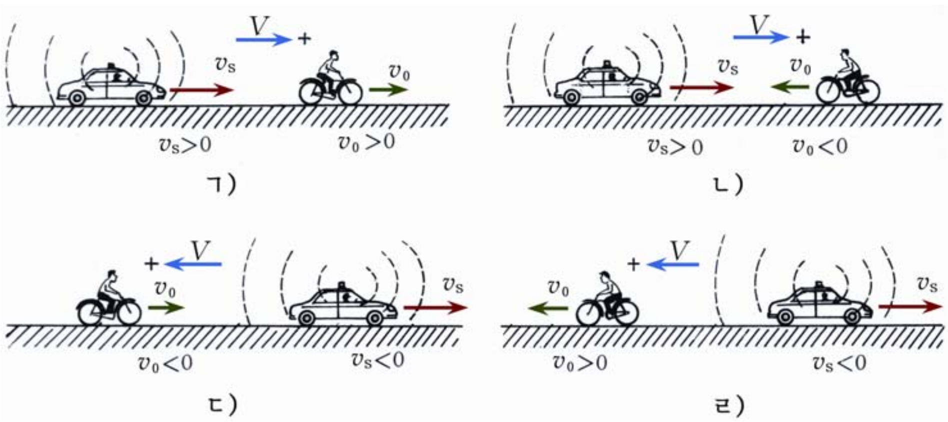


그림 10-25. 파원과 관측자가 둘다 움직일 때 진동수변화

⚠ 파동의 전파방향은 파원에서 관측자쪽으로 향하도록 정한다.

식 3으로부터 다음과 같은 결론이 나온다.

관측되는 파동의 진동수는 파원과 관측자가 멀어지면 작아지고 가까와지면 커진다.

도플러효과는 여러가지 파동에서 다 나타난다.

생각하기

○ 그림 10-25에서 매 경우 진동수변화식을 써보아라.

○ 그림 10-26과 같이 파동의 전파방향과 음원 및 관측자의 이동속도방향이 일치하지 않을 때(일정한 각을 이룰 때) 도플러효과식을 써보아라.

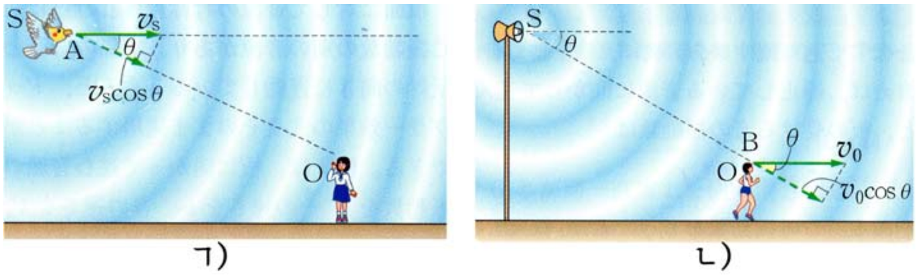


그림 10-26

문 제

1. 도플러효과에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 옳은것을 선택하고 리유를 밝히여라.
   ㄱ) 관측자에 대하여 파동의 전파속도가 변하면 반드시 진동수도 변한다.
   ㄴ) 파원과 관측자가 운동하면 반드시 도플러효과가 일어난다.
   ㄷ) 파원과 관측자가 멀어지면 소리가 반드시 낮아진다.
   ㄹ) 도플러효과는 소리파에서만 나타나는 특이한 현상이다.
2. 급행렬차가 54km/h의 속도로 한 역을 지나면서 진동수가 400Hz인 기적소리를 울리고 역구내에 서있는 다른 기관차도 같은 높이의 기적소리를 울린다. 소리의 전파속도는 340m/s이다.
   ㄱ) 서있는 기관차의 기관사는 급행렬차가 다가올 때와 멀어질 때 어떤 진동수의 기적소리를 듣겠는가?
   ㄴ) 급행렬차의 기관사는 멎어있는 기관차의 기적소리를 어떤 진동수의 소리로 듣겠는가?
   ㄷ) 두 렬차가 복선철길에서 같은 속도로 어긴다면 기관사들은 어떤 진동수의 기적소리들을 듣겠는가?
3. 배가 300Hz의 고동소리를 내면서 5m/s의 속도로 절벽에 다가갈 때 배에서는 절벽에서 반사된 소리가 어떤 진동수의 소리로 들리겠는가? 소리의 전파속도는 340m/s이다.

제 5 절. 전자기마당과 전자기파

전자기마당

변하는 자기마당속에 놓여있는 도체속에는 회리전류가 흐른다. 일반적으로 전류는 전기마당에 의하여 생겨난다. 따라서 회리전류가 흐른다는것은 회리모양의 전기마당이 도체속의 자유전자들에 작용하였다는것을 말해준다. 결국 변하는 자기마당은 회리전기마당을 만든다는것을 알수 있다. 회리전기마당의 전력선은 정전기마당의 전력선과는 달리 닫긴다.(그림 10-27)

이렇게 변하는 자기마당둘레에 생기는 회리모양의 전기마당을 **회리전기마당**이라고 부른다.

회리전기마당의 세기는 자기유도의 변화속도 $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 에 비례하며 방향은 렌쯔의 규칙에 의하여 결정된다.

변하는 자기마당둘레에는 도체가 있거나 없거나 관계없이 언제나 회리전기마당이 존재한다.

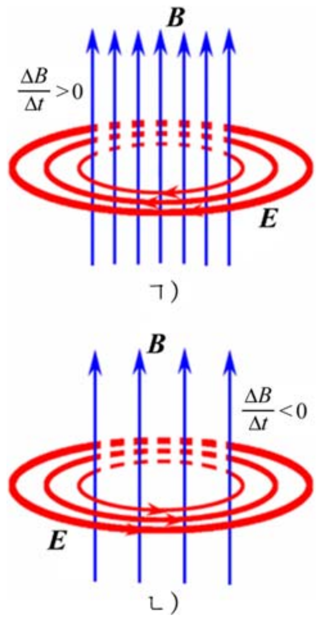


그림 10-27. 회리전기마당의 방향

여기에 도체를 가져가면 회리전류가 흐르며 그리하여 회리전기마당이 있다는것을 알수 있게 된다.

❓ 변하는 자기마당이 회리전기마당을 만든다면 반대로 변하는 전기마당은 자기마당을 만들지 않겠는가.

축전기가 들어있는 교류회로를 생각해보자.

축전기를 교류전원에 련결하면 극판의 충방전이 엇바뀌면서 극판사이의 전기마당이 시간에 따라 변한다.

그런데 닫긴교류회로에 전류가 흐른다는것은 축전기극판사이에도 그 어떤 《전류》가 흐르기때문이라고 생각할수 있다. 이로부터 영국 물리학자 막스웰은 축전기극판사이에 존재하는 변하는 전기마당이 전류의 본성을 가지고있다고 보고 이 전류를 《변위전류》라고 가정하였다.

즉 변하는 전기마당을 **변위전류**라고 부른다.

한편 전류는 둘레에 자기마당을 만든다. 따라서 변위전류 즉 변하는 전기마당은 둘레에 변하는 회리자기마당을 만들것이다.(그림 10-28)

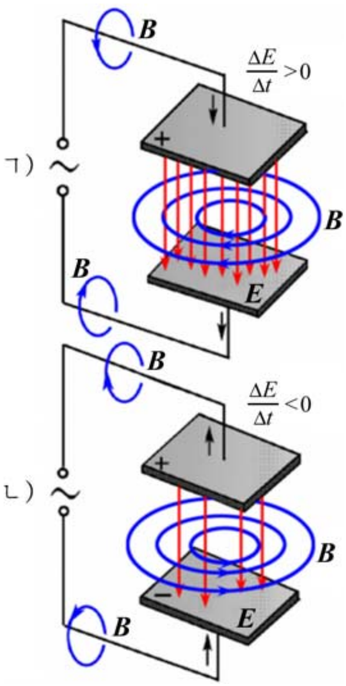


그림 10-28. 변하는 전기마당에 의한 자기마당

이렇게 변하는 자기마당이 회리전기마당을 만드는것처럼 변하는 전기마당도 회리자기마당을 만든다.

이 자기마당의 자기유도는 전기마당의 세기의 변화속도 $\frac{\Delta E}{\Delta t}$에 비례한다.

이처럼 변하는 전기마당과 자기마당은 서로 뗄수 없이 련결되여있다.

시간에 따라 변하는 전기마당과 자기마당이 하나로 통일되여있는 마당을 **전자기마당**이라고 부른다.

전자기파

전기마당이나 자기마당의 변화가 고르지 않아서 $\frac{\Delta E}{\Delta t}$와 $\frac{\Delta B}{\Delta t}$가 일정하지 않으면 생겨나는 마당도 변하는 마당으로 되며 이것이 또 새로운 마당을 만든다.

즉 어떤 자리에서 전기마당이 변하면 둘레에 변하는 자기마당이 생기고 또 그 둘레에 변하는 전기마당이 생기는 식으로 전자기마당이 공간으로 퍼질수 있다.

이것은 전기 및 자기마당의 변화가 퍼져가는 과정으로서 파동으로 된다.

이처럼 공간으로 퍼져나가는 전자기마당을 **전자기파**라고 부른다.(그림 10-29)

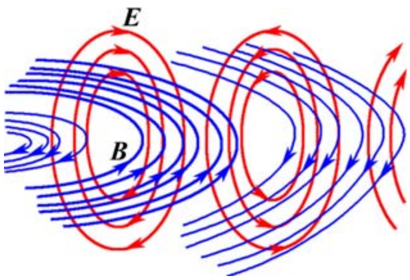


그림 10-29. 전자기마당의 퍼짐

막스웰은 전자기파의 존재를 예견하였을뿐아니라 진공속에서

$$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\approx 3\times 10^8\,\mathrm{m/s}$$

라는 속도로 퍼지며 전자기파가 퍼지는 공간의 매 점에서 전기마당의 세기와 자기유도사이에는 다음과 같은 관계가 있다는 결론을 내렸다.

$$E=cB$$

전자기파의 발생원인

전자기파가 생기는것은 전기띤 알갱이들의 가속운동과 관련된다. 전기띤 알갱이가 멎어있거나 등속직선운동하면 둘레에는 정전기마당만 있거나 정전기마당과 정자기마당이 알갱이를 따라갈뿐이고 퍼져나가지 않는다. 전기띤 알갱이들이 가속되면 결국 시간에 따라 전류가 변하는것으로 되며 따라서 변하는 자기마당과 전기마당이 생겨 전자기파가 퍼져나갈수 있다.

알갱이들의 가속도가 클수록 자기 및 전기마당의 변화속도가 커서 전자기파가 세게 퍼져나갈수 있다.

문 제

1. 진동회로에 전기진동이 일어나면 전기마당과 자기마당은 시간에 따라 어떻게 변하는가?
2. 직선전류가 만드는 회리자기마당과 변하는 전기마당이 만드는 회리자기마당은 어떻게 다른가?
3. 전자기마당과 전자기파에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 전자기마당이 있으면 반드시 전자기파가 발생한다.
   ㄴ) 교류는 둘레에 반드시 전자기마당을 형성한다.
   ㄷ) 전기마당 및 자기마당의 변화가 클수록 전자기마당의 에네르기는 반드시 크다.
   ㄹ) 전기마당과 자기마당이 함께 있으면 반드시 전자기마당으로 된다.

제 6 절. 전자기파의 복사

방송국에는 높은 탑우에 안테나들이 있고 무선전신기나 전화기에도 안테나가 있다. 이러한 안테나들은 왜 있으며 거기에서는 무엇이 나오는가.

전자기파의 복사조건

? 진동회로에서 전기진동이 일어나면 언제나 전자기파가 나오는가.
전자기파가 잘 복사되려면 어떤 조건이 있어야 하는가.

전자기파가 잘 복사되려면 우선 진동회로의 주파수가 충분히 커야 한다.

일정한 전기량이나 정상전류주위에는 정전기마당과 일정한 자기마당만 있고 전자기마당은 생기지 않는다.

변하는 전기량이나 전류에 의하여 변하는 전기마당과 자기마당이 생기고 전자기마당이 생길수 있다. 그리고 전기마당과 자기마당의 변화속도가 클수록 전자기마당도 더 세진다.

진동회로에서 주파수가 큰 전기진동이 일어나면 주위의 전기마당과 자기마당이 빨리 변하며 센 전자기마당이 생겨 전자기파가 퍼져나갈수 있다.

진동회로의 주파수가 크려면 회로의 전기용량 C와 유도결수 L이 작아야 한다.

$$\nu_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

다음으로 전자기파가 잘 복사되자면 진동회로가 열려야 한다.

선륜과 축전기로 된 진동회로에 전기진동이 일어나면 전자기마당이 선륜과 축전기속에 집중되여있고 이것이 밖(점 P)으로 퍼져나오지 못한다.

이러한 진동회로를 **닫긴진동회로**라고 부른다.(그림 10-30)

축전기의 극판의 면적을 줄이고 극판사이의 거리를 늘이며 선륜을 펴놓으면 집중되여있던 전자기마당이 공간으로 퍼질수 있다.(그림 10-31)

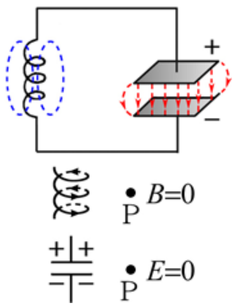


그림 10-30. 닫긴진동회로

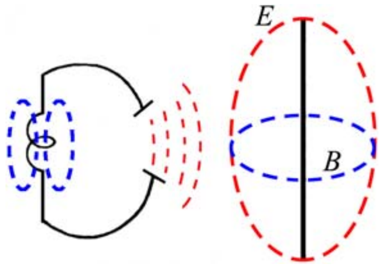


그림 10-31. 열린진동회로

이 진동회로는 전기용량 C와 유도결수 L이 전체 회로에 고르롭게 분포되여있다고 볼수 있으므로 전자기파를 멀리까지 전파되게 할수 있다. 이러한 진동회로를 **열린진동회로** 또는 **안테나**라고 부른다.(그림 10-32)

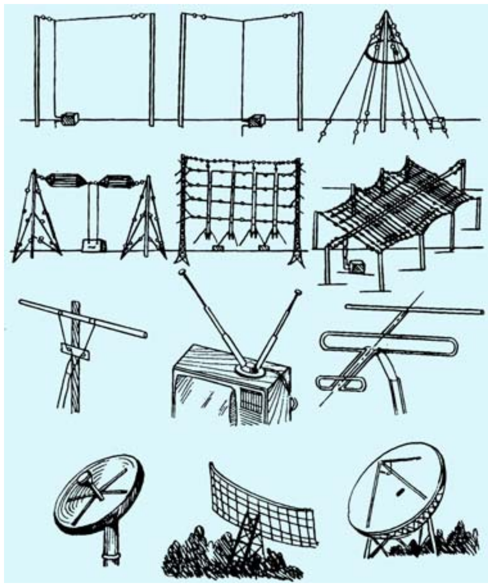
방송국에서 전자기파를 내보내는 안테나도 열린진동회로이다.

안테나는 L과 C가 작아서 고유진동수가 크다.

안테나로부터 전자기파를 내보내는것을 **전자기파의 복사**라고 부르며 안테나가 전자기파를 받아들이는것을 **전자기파의 수신**이라고 부른다.

전자기파를 복사하는 안테나를 **송신안테나**, 전자기파를 받아들이는 안테나를 **수신안테나**라고 부르며 한개 안테나로 송신도 하고 수신도 할수 있다.

전자기파를 계속 복사하자면 전기진동회로에 에네르기를 계속 보태주어야 한다.


그림 10-32. 여러가지 안테나

안테나가 전자기파를 복사하면 그만큼 안테나의 진동에네르기가 작아진다. 즉 전자기파를 계속 복사하면 나중에는 전기진동이 멎게 된다.

그러므로 전자기파를 계속 복사하려면 외부로부터 안테나에 고주파에네르기를 계속 공급해주어야 한다.

안테나에서 전자기파의 복사

고주파발진기를 안테나와 이어놓고(그림 10-33) 발진주파수를 안테나의 고유주파수와 같게 조절하면 안테나에는 전기공진이 일어나 센 고주파전류가 흐르면서 전자기파를 복사한다.

안테나에서 일어나는 전기진동을 전기량이 같고 부호가 반대인 한쌍의 점전하가 서로 반대자리각으로 진동하는것으로 볼수 있다.

시간에 따라 전하의 운동상태가 변하면 전력선의 모양도 변한다.(그림 10-34)

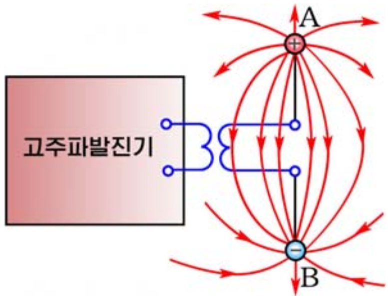


그림 10-33. 고주파발진기에 이은 안테나

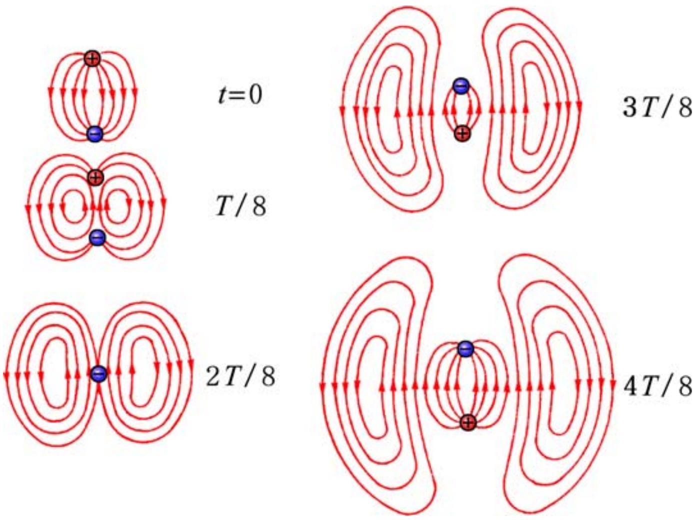


그림 10-34. 안테나에서 전자기파의 복사과정

두 전하가 안테나의 량끝에 있는 순간으로부터 $2T/8$만큼 지나면 두 전하가 한 점에 모이고 전력선들은 모두 닫긴다.

다음 순간에는 이 닫긴 전력선들이 떨어져나가고 전하들로부터는 반대방향의 전력선들이 생겨 점점 퍼져나간다.

그리하여 $T/2$인 때 두 전하는 처음과는 반대되는 안테나끝에 있게 되고 새로 생긴 전력선들은 처음 순간과 같은 모양을 가지면서 방향이 정반대로 된다.

$6T/8$인 때 두 전하는 다시 중간점에서 만나 새로 생긴 전력선들이 다 닫겨 안테나로부터 떨어져나간다.

이런 방법으로 안테나로부터 전자기파가 퍼져나간다.

안테나로부터 충분히 먼 거리에서 전자기파는 구면파로 된다.

전력선들은 안테나에 중심을 둔 구면의 자오선들을 따라, 자력선들은 안테나에 수직인 평면에서 안테나에 중심을 둔 원둘레들을 따라 분포된다.(그림 10-35)

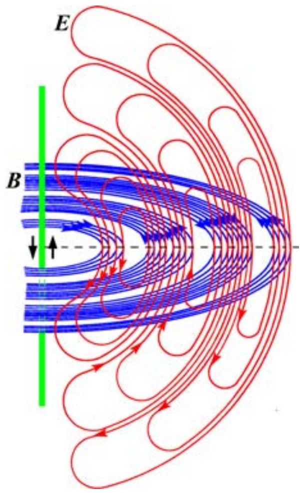


그림 10-35. 안테나주위에서 전력선과 자력선의 분포

생각하기 그림 10-36과 10-37에서 어느 경우에 전자기파가 더 잘 수신되며 그에 따라 간단한 안테나를 만드는 방법을 생각하여보아라.

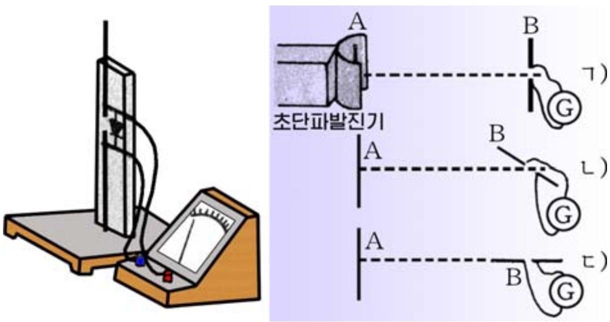


그림 10-36

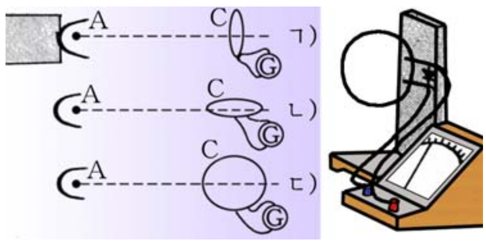


그림 10-37

문제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝히여라.
   ㄱ) 전자기파는 전기진동이 퍼져나가는것이 아니라 전자기마당이 전파되는것이다.
   ㄴ) 닫긴진동회로의 주파수는 열린진동회로의 주파수보다 반드시 작다.
   ㄷ) 60Hz의 교류회로에서는 전자기파가 거의 복사되지 않는다.
   ㄹ) 전자기파의 복사과정은 반드시 매질이 있어야 진행된다.
2. 가까운 곳에서 전기용접을 하거나 전차가 지나가면 라지오와 TV에서 《찌륵찌륵》하는 소리가 나고 화면이 이지러진다. 왜 그런가?
3. 축전기의 전기용량이 40pF이고 선륜의 유도결수가 10μH인 진동회로에서 복사되는 전자기파의 진동수와 파장을 구하여라.

제 7 절. 전자기파의 성질

전자기파의 성질

전자기파의 전기마당과 자기마당의 방향. 그림 10-36에서 ㄱ의 경우 검류계바늘이 제일 많이 벌어진다. 이것은 전기마당의 방향이 발진기안테나에 평행이라는것을 의미한다.

그림 10-37에서 ㄴ의 경우 검류계바늘이 제일 많이 벌어진다. 이것은 자기마당의 방향이 발진기안테나에 수직이라는것을 의미한다.

따라서 전자기마당에서 전기마당과 자기마당은 서로 수직이며 전기마당과 자기마당방향에 수직되는 방향으로 전자기파가 퍼져나간다.(그림 10-38)

즉 전자기파는 가로파이다.

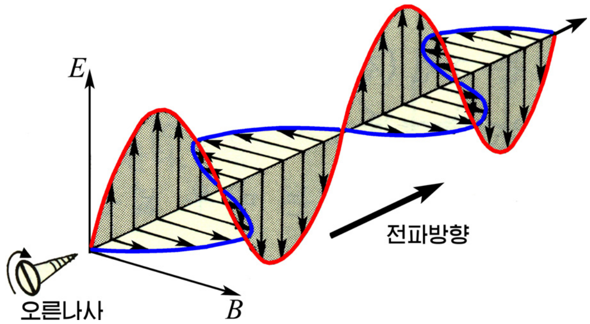


그림 10-38. 전자기파는 가로파이다

전자기파의 몇가지 성질. 전자기파는 도체에 심히 흡수되고 유전체에는 잘 흡수되지 않는다.

전자기파는 금속에서 반사법칙을 만족시키며 유전체에서는 잘 반사되지 않는다.

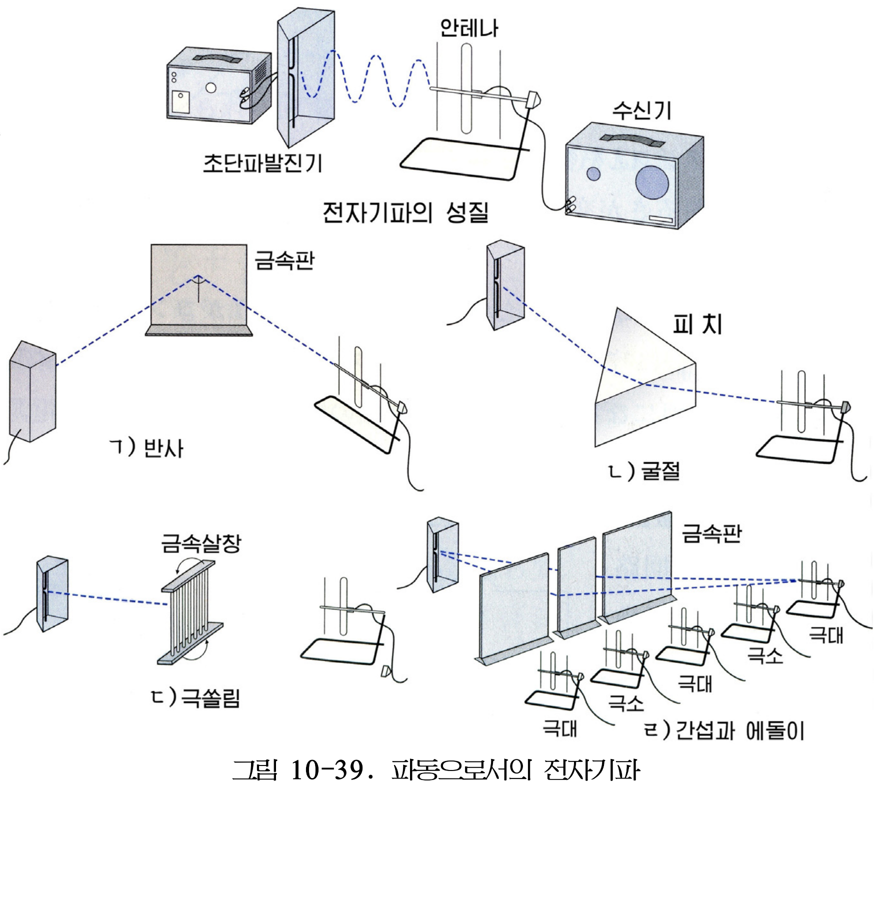


그림 10-39. 파동으로서의 전자기파

파라핀이나 피치로 만든 큰 삼각프리즘을 지날 때 전자기파가 굴절한다는것을 확인할수 있다.

전자기파는 간섭과 에돌이를 일으킨다.(그림 10-39)

틈이 넓어지면 에돌이가 잘 나타나지 않고 틈이 좁아지면 에돌이가 잘 나타난다.

전자기파의 리용

전자기파는 파장 및 주파수에 따라 전파방식이 차이난다.

전자기파의 파장대역

파장대역	주파수대역	대역이름	대역기호
10km~1km	0.3MHz	장파	LW
1km~100m	0.3~3 MHz	중파	MW
100m~10m	3~30MHz	단파	SW, HF
10m~1m	30~300 MHz	초단파	VHF
1m~10cm	300MHz~3GHz	극초단파	UHF
10cm~1cm	3~30GHz	초고주파	SHF
1cm~1mm	30~300GHz	극초고주파	EHF

전파방식에는 우선 **공간파전파방식**이 있다. 이 전파방식은 전자기파의 반사를 리용한것이다.

땅걸면 50km로부터 수백km사이에는 많은 기체분자들이 태양빛에 의하여 이온화된 플라즈마상태에 있게 되는데 이 층을 **이온층**이라고 부른다.

이온층은 일정한 전자기파대역에서 도체처럼 전자기파를 반사시킨다.(그림 10-40) 이런 의미에서 이온층을 자연반사층이라고 말할수 있다.

이온층에서 반사되여 전파되는 전자기파를 **공간파**라고 부른다.

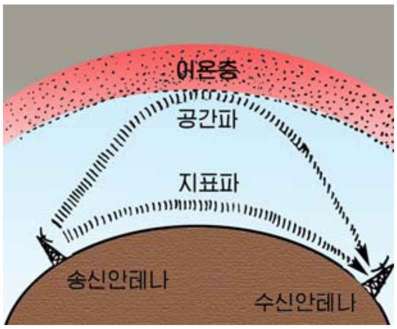


그림 10-40. 공간파와 지표파

공간파는 땅걸면과 이온층사이에서 여러번 반사되며 지어 지구를 돌아올수도 있다.

전파방식에는 또한 **지표파전파방식**이 있다. 땅걸면을 따라 퍼져나가는 전자기파를 **지표파**라고 부른다. 대체로 대류권이내(약 8km)에서 전파된다.

지표파의 전파에서는 땅걸면에서 전자기파의 회리손실 즉 흡수현상을 잘 고려해야 한다. 지구가 도체이므로 전자기파에 의하여 땅걸면에 회리전류가 발생한다. 이 회리전류는 전자기파의 에네르기손실을 가져온다. 주파수가 높을수록 전자기파는 땅에 흡수되여버리고 만다. 그러므로 단파보다 파장이 더 짧은 전자기파는 지표파로 전파되지 못한다.

대체로 장파, 중파, 단파가 공간파와 지표파로 전파된다.

장파나 중파와 같이 파장이 긴 대역의 전자기파는 지표파로, 단파나 중파와 같이 파장이 짧은 대역의 전자기파는 공간파로 전파된다.

그림 10-41에서 보는것처럼 공간파로 전파되는 단파통신에서는 땅걸면의 일부지역에서 신호를 받을수 없는 구역이 있다. 이런 구역을 **불감지대**라고 부른다.

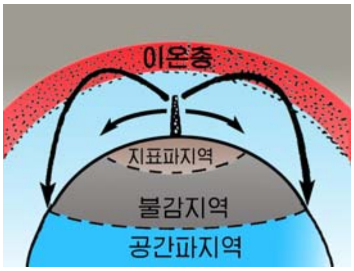


그림 10-41. 공간파의 불감지대

지표파로 전파되는 장파는 파장이 길어 에돌이가 잘 일어나며 흡수가 적어 멀리까지 전파될수 있다. 장파는 신호가 고르롭고 믿음직하다.

라지오방송에서는 흔히 주파수가 작고 파장이 긴 장파, 중파, 단파를 공간파나 지표파전파방식으로 리용한다.

전자기파의 전파방식에는 **직진파전파방식**도 있다. 빛처럼 곧추 전파되는 전자기파를 **직진파**라고 부른다.

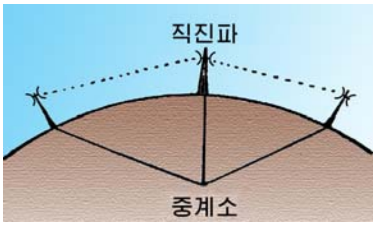


그림 10-42. 중계소와 직진파

직진파는 대체로 눈으로 볼수 있는 구역밖에는 전파되지 못하므로 중계소를 많이 세워야 한다.(그림 10-42)

초단파보다 파장이 짧은 전자기파는 대체로 직진파로 전파된다.

초단파는 장파, 중파, 단파에 비하여 잡음이 적고 지향성이 강하여 통신의 질을 높일수 있다.

TV방송에서 많이 리용하는데 지금은 인공위성에 의하여 중계되므로 중계탑없이 먼곳까지 나가고있다.

파장이 1mm~30cm까지의 범위에 있는 전자기파를 **마이크로파**라고 부른다. 직진파전파방식에서 마이크로파는 아주 중요한 자리를 차지한다. 마이크로파는 레이다(전파탐지기)와 위성봉사체계에 리용되고있다.

참고 전파장애전

전파장애전은 전자기파의 성질을 리용하여 상대측레이다의 기능을 마비시키는 전파기술을 말한다. 전파전, 전자전이라고도 부른다.

전파장애기, 전파장애위성이라는 말도 이런 기능을 수행한다는 의미를 담고있다.

레이다망의 전파기술은 현대전에서 없어서는 안될 중요한 수단의 하나이며 그에 따라 상대측레이다망의 비밀을 알아내기 위한 맹렬한 공작들을 벌리고있다. 그만큼 레이다망기술은 극비로 되고있다.

레이다는 마이크로파를 리용하여 물체의 위치(거리, 각도), 구성성분 등을 알아내는 무선설비이다.

그림 10-43에 레이다에 의하여 물체까지의 거리를 측정하는 방법을 보여준다. 레이다는 기상예보와 크고작은 무기에 설치되여 《전자눈》의 역할을 하고있다.(그림 10-44)

위성에 설치한 레이다로 지구에 마이크로파를 내보내고 반사파를 잡아 분석하여 지표, 지각의 성질, 구조, 형태 등을 탐사하고있다.

위성봉사체계는 지구우에 띄운 인공지구위성을 리용하여 전파를 중계하는 체계를 의미한다.(그림 10-45)

위성에서는 지구에서 쏜 전파를 수신안테나로 받고 신호를 크게 한 다음 송신안테나로 내쏜다. 이런 체계를 리용하여 작은 중계소들을 세우지 않고도 임의의 장소에서 진행되는 사건과 자료들을 즉시 시청할수 있다.

이온층을 피동반사체, 자연반사체라고 한다면 중계위성을 능동반사체, 인공반사체라고 말할수 있다.

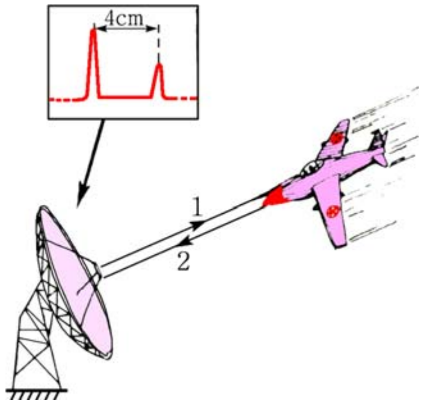


그림 10-43. 레이다에 의한 거리측정

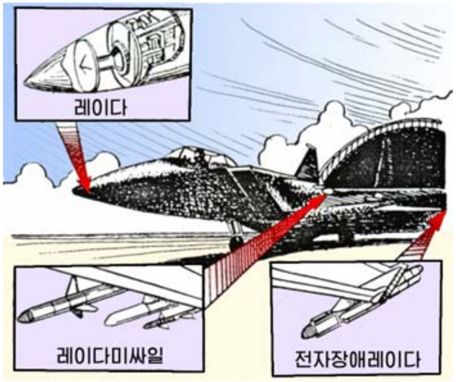
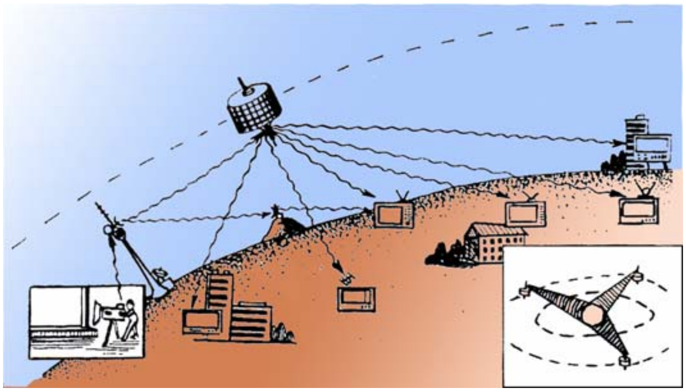


그림 10-44. 비행기에서 레이다의 리용


그림 10-45. 위성봉사체계

[례제] 그림 10-43에서 레이다로 물체까지의 거리를 재는 방법을 설명하여라.

풀이. 전자기파 1을 내쏘고 반사파 2를 수신한다. 전자기파는 파장에 관계없이 빛속도 c로 전파되므로 신호 1, 2사이의 시간을 측정하여 $S=ct/2$에 의하여 물체까지의 거리를 알수 있다. 실지 레이다설비에는 물체의 위치가 직접 영사막(형광판)에 나타나게 되여있다.

문 제

1. 단파라지오는 낮보다 밤에 더 고르롭고 크게 들린다. 그 리유는 무엇인가?(이온층이 태양빛의 세기에 따라 달라진다는것을 고려하여라.)
2. TV중계탑은 라지오중계탑보다 높이 세운다. 그 리유는 무엇인가?
3. 위성봉사체계에서는 왜 마이크로파를 리용하는가?
4. 레이다를 어떻게 하면 혼란에 빠뜨릴수 있는가?
5. 만일 TV중계탑의 송신안테나가 수평으로 설치되여있다면 가정들에서 수신안테나를 어떻게 설치해야 하는가?



문제: 현악기에서 소리가 나는 원리를 알아보아라.

방향: 기타나 바이올린에서 매듭의 자리에 따라서 줄이 어떤 진동을 하는가를 알아보고 그림을 그려보아라.

- 현악기에서 울림통이 어떤 역할을 하는가를 여러가지 실험을 진행해보고 조사해보아라.
- 울림통의 재질과 모양에 따라 소리가 어떻게 달라지는가를 조사해보아라.



복습문제

1. 기체속에서 소리의 전파속도는 압력의 1/2제곱에 비례하고 밀도의 1/2제곱에는 거꿀비례한다. 그러나 주어진 온도에서는 기체를 압축하여도 소리의 속도가 달라지지 않는다. 왜 그런가? 리상기체로 보고 대답하여라.
2. 하나의 전동기에서 나오는 소음의 세기준위가 50dB이다. 꼭같은 전동기 10대가 동시에 돌아갈 때 나오는 소음의 세기준위는 얼마인가? 이때 소음의 세기는 얼마인가?

   (**답**. 60dB, 10^{-6} W/m^2)
3. 사람이 보통 말할 때 내는 소리의 출력(1s동안에 내는 소리에네르기)은 2.5×10^{-5} W이고 사람이 들을수 있는 소리의 최소세기는 10^{-12} W/m^{2}이다. 사람이 내는 소리파를 구면파로 보고 다음 물음에 대답하여라.

   ㄱ) 1m와 10m 거리에서 소리의 세기와 세기준위는 각각 얼마인가?

   ㄴ) 말소리를 들을수 있는 최대거리는 얼마인가?

   (**답**. ㄱ) 4×10^{-6} W/m^2, 66dB, 4×10^{-8} W/m^2, 46dB ㄴ) 1 995 m)

4. 귀에 들려오는 소리의 세기가 $1W/m^2$이상이면 들리지는 않고 귀가 아프다. 100m밖에서 폭발소리를 들을 때 소리의 세기준위가 100dB이라면 어떤 거리에서 귀아픔을 느끼겠는가? 소리의 세기는 거리의 두제곱에 거꿀비례한다.

(답. 10m)

5. 팽팽히 당겨 량끝을 고정한 줄의 길이가 80cm일 때 이것을 튕기면《쏠》음이 나온다. 장력이 같을 때 《도》음과 《화》음이 나게 하려면 이 줄의 길이를 각각 얼마로 해야 하는가? 《도》, 《화》, 《쏠》음의 진동수비는 4:5:6이다.

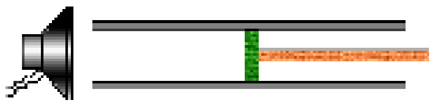
(답. 1.2m, 0.96m)

6. 길이가 1m인 2개의 꼭같은 줄이 진동하면서 같은 소리를 낸다. 줄 하나는 그대로 두고 다른 하나의 길이를 5mm만큼 줄인 다음 다시 진동하게 하면 진동수가 2Hz만큼 차이나는 소리들을 낸다. 이 줄들의 기본음의 진동수는 얼마인가?

(답. 398Hz, 400Hz)

7. 긴 유리관에 원판이 붙은 막대기를 꽂아 한끝이 열린 공기기둥을 만들고 작은 고성기에서 나는 소리를 들여보낸다.(그림 10-46)

ㄱ) 막대기로 원판을 움직이면 원판이 관의 열린 끝으로부터 17.5cm와 55.5cm 거리에 있을 때의 소리가 크게 울린다. 진동수가 450Hz라면 소리속도는 얼마인가? 관끝가까이에 생기는 정상파의 배는 어디에 있는가?


그림 10-46

ㄴ) 공기기둥의 길이를 55.5cm로 고정하고 고성기가 내는 소리를 높여갈 때 어떤 진동수의 소리가 크게 들리겠는가?

(답. ㄱ) 342m/s, 1.5cm ㄴ) 750Hz)

8. 선밀도가 0.2g/m인 줄의 한끝을 고정하고 다른 끝에는 질량이 2.5kg인 추를 달아 도르래에 걸어놓았다. 이 줄을 진동시켜 소리를 낸 다음 줄가까이에 길이가 24cm인 량끝이 다 열린 관을 가져왔더니 공명이 일어났다. 소리속도가 340m/s라면 줄의 길이는 얼마인가?(기본진동인 경우를 고려하여 풀어라.)

(답. 약 24.7cm)

9. 진동수가 440Hz인 소리를 내는 꼭같은 두 음차중 한개의 음차의 팔에 쇠줄을 감으면 그것이 내는 소리가 약간 낮아진다. 두 음차를 함께 울리고 소리를 들으면 소리가 커졌다작아졌다한다. 이것이 소리의 맥노리이다. 2s사이에 3번씩 소리가 커졌다작아졌다한다면 쇠줄을 감은 음차의 진동수는 얼마인가?

(답. 438.5Hz)

10. 소리를 반사하는 벽체가 땅에 수직으로 서있고 진동수가 500Hz인 소리를 내는 물체가 0.68m/s의 속도로 벽체쪽으로 움직이고있다. 소리속도는 340m/s이고 바람은 불지 않는다.

ㄱ) 음원뒤에 서있는 사람은 음원으로부터 직접 오는 소리와 벽체에서 반사되여오는 소리를 어떤 진동수의 소리로 듣겠는가?

ㄴ) 음원과 벽체사이에 있는 사람은 음원에서 직접 오는 소리와 벽체에서 반사되여오는 소리를 어떤 진동수의 소리로 들으며 어떤 맥노리를 듣겠는가?

ㄷ) 음원과 벽체사이에서 벽을 향하여 1.56m/s의 속도로 움직이면서 들으면 어떤 맥노리를 듣겠는가?

(**답**. ㄱ) 499Hz, 501Hz ㄴ) 501Hz, 501Hz, 맥노리는 없다. ㄷ) 1s당 4.6회)

11. 그림 10-47과 같이 네거리에서 두 길로 구급차와 자전거선수가 교차점 O를 향하여 달리고있다. 구급차는 700Hz의 소리를 내면서 30m/s의 속도로, 자전거선수는 15m/s의 속도로 운동하고있다. 구급차(S)와 자전거(C)를 맺는 직선과 도로들이 이루는 각이 60°, 30°인 순간에 자전거선수는 구급차가 내는 소리를 어떤 진동수의 소리로 듣겠는가? 공기속에서 소리의 전파속도는 340m/s이다.

(**답**. 760Hz)

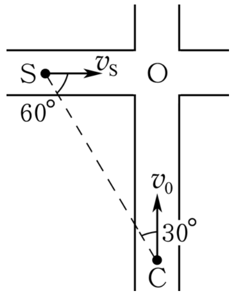


그림 10-47

12. 72km/h의 속도로 움직이는 기관차가 2s동안 기적소리를 울렸다. 다음과 같은 경우들에서 사람이 느끼게 되는 기적소리의 겉보기지속시간을 구하여라. 공기속에서 소리의 전파속도는 340m/s이다.

ㄱ) 기관차가 가까이 다가오고있는 경우

ㄴ) 기관차가 멀어지고있는 경우

(**답**. ㄱ) $1\frac{15}{17}$s ㄴ) $2\frac{2}{17}$s)

13. TV의 한개 화면은 625개의 수평줄(주사선)로 되여있고 매 줄의 길이는 화면높이의 4/3배이다. 1s사이에 25개의 화면을 보내려면 1s사이에 최소한 몇개의 신호(한개의 신호는 화면을 이루는 한개의 점에 대응된다.)를 보내야 하는가? 한개의 신호가 8개의 파장으로 이루어진다면 TV송신에 쓰이는 전자기파(초단파)의 주파수와 파장은 얼마인가?

(**답**. 1.3×10^7개, 1.04×10^8Hz, 2.9m)

14. 바다물속에서 전파탐지가 가능한가? 왜 그런가?

15. 레이다로 목표를 탐지하는데는 복사지속시간이 짧은 전자기파를 쓴다. 파장이 20cm인 극초단파를 써서 3 000개의 파장으로 된 임풀스를 내보낸다면 복사지속시간은 얼마인가? 15km 거리에 있는 목표물까지 전자기파가 갔다오는 동안 복사를 멈추려면 신호주기를 얼마로 하여야 하는가?(그림 10-48)

(**답**. 2μs, 102μs)

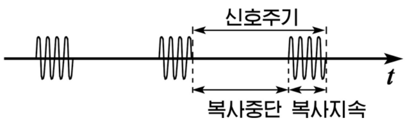


그림 10-48

16. 한 라지오방송국에서 복사된 전자기파를 50km 떨어진 수신국에서 수신할 때 직접 오는 파를 받은 다음 5.2×10^{-4}s 지나서 이온층에서 반사되여온 파를 받았다면 이온층의 높이는 얼마인가?

(답. 약 100km)

17. 그림 10-49는 대양을 항행하는 배에 설치된 방향탐지안테나를 보여준다. 안테나는 신호가 최소일 때 자동적으로 멎는다. 전파방향에 대하여 어떤 각도에서 멎겠는가?

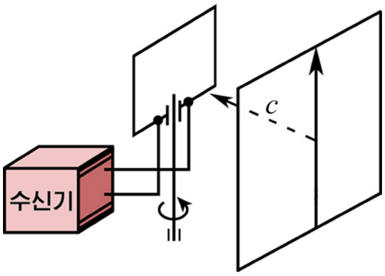


그림 10-49

18. 극초단파발진기에서 복사되는 전자기파를 금속판으로 반사시켜 복사방향과 반대로 나가게 하면 정상파가 생긴다. 전기마당측정기를 금속판으로부터 발진기쪽으로 54cm 옮겨갈 때 7개의 마디가 관측된다면 초단파의 주파수는 얼마인가?(그림 10-50)

(답. 약 1.95×10^{9}Hz)

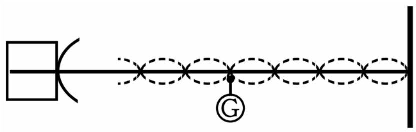


그림 10-50

19. 1 200MHz의 극초단파를 복사하는 두 안테나사이의 거리가 50cm일 때 다음과 같은 직선우에서 간섭의 극대점들을 찾아보아라.(그림 10-51)

ㄱ) 두 안테나를 맺는 직선 A_1A_2

ㄴ) A_1A_2에 평행이면서 1m 떨어진 직선우에서 점 O에 가장 가까운 곳

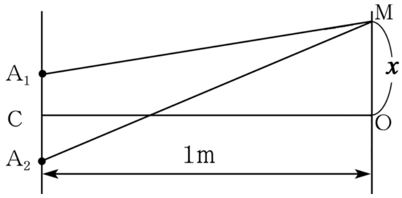


그림 10-51

(답. ㄱ) 점 A_1로부터 0, 12.5cm, 25cm, 37.5cm, 50cm 되는 점
ㄴ) ±59cm)

20. 유전률이 ε이고 투자률이 μ인 매질속에서 전자기파의 전파속도는 $v=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$와 같다. 전자기파가 진공으로부터 $\varepsilon=2$, $\mu=1$인 매질로 45°의 입사각으로 들어간다면 굴절각은 얼마인가?

(답. 30°)

실　험

실험 1. 등전위선 연구

목적. 이 실험에서는 대전체(전류)둘레의 전기마당의 분포를 보여주는 등전위선을 따져본다.

기초지식. 전지에 이은 두 금속전극이 공기속에 있을 때 공간의 임의의 점에서 전기마당의 전위를 재기는 힘들다. 그것은 두 전극사이에서 전류가 흐르지 않기때문이다.

그러나 금속전극이 전도성이 낮은 물질속에 있을 때 정상전류가 흐르는 물질속의 전기마당은 그 전극이 공기속에 있을 때와 같은 모양을 가진다.

그러므로 전도성이 낮은 종이우에 전극을 놓고 전지를 이으면 종이면에서 전류가 흐르는 길은 전력선과 일치하며 이 전력선과 수직으로 사귀는 등전위선은 검류계로 전위가 같은 점들을 찾아 그릴수 있다.

기구 및 재료

여러가지 모양의 금속전극들(그림 1), 검류계(μA전류계), 먹칠한 전도성종이, 먹지, 흰 종이, 건전지(1.5V) 2개, 한끝이 뾰족한 탐침이 달린 련결선 2개, 련결선, 나무판, 납작못 4개

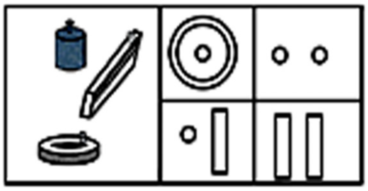


그림 1. 여러가지 모양의 금속전극들

실험방법

1) 매끈한 나무판에 흰 종이, 먹지, 먹칠한 전도성종이를 차례로 펴놓고 네 모서리를 납작못으로 고정한다.
2) 전도성종이우에 고리모양의 전극을 놓고 그의 중심에 작은 원기둥모양의 전극을 놓은 다음 고리와 중심에 련결선으로 전지(3V)를 잇는다. 여기서 고리모양전극의 밑면은 수평이 되고 매끈해야 접촉이 잘된다.

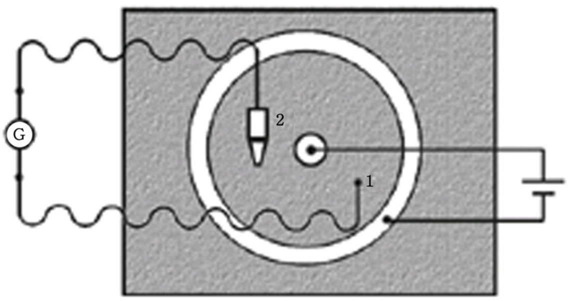


그림 2. 등전위선을 찾는 실험장치

3) 검류계의 두 단자에 탐침 1, 2를 잇는다.
4) 탐침 1을 중심에 있는 전극가까운 근방에 접촉시킨다.(그림 2)

5) 탐침 2를 전도성종이의 임의의 다른 점에 접촉시키면서 검류계의 바늘이 0눈금을 가리키는 점을 찾아 누른다.
6) 우와 같은 방법으로 탐침 2의 자리를 옮기면서 탐침 1과 전위가 같은 점들을 전극둘레에서 찾아 탐침을 누른다.
7) 탐침 1의 접촉점을 고리모양의 전극쪽으로 옮겨가면서 우의 실험과정을 반복한다.
8) 전극들에서 련결선을 해체하고 전도성종이밑의 흰 종이를 뽑아낸 다음 다른 흰 종이를 넣고 우와 같은 방법으로 작은 점전극과 평판전극사이, 평판과 평판전극들사이의 등전위선을 찾는다.

결과 및 분석

1) 흰 종이우에 찍힌 등전위점들을 이어 등전위선을 그린다.
그리고 등전위선에 수직으로 사귀는 전력선들을 그린다.
2) 실험에서 찾은 매개 전극들에서 등전위선모양은 어떤 모양인가를 지적하고 리상적인 등전위선과 비교하며 있을수 있는 오차원인을 찾는다.
3) 실험을 통하여 등전위선과 전력선관계를 밝히고 느낀 점을 쓴다.

과 제

1. 왜 검류계의 바늘이 령눈금을 가리키는 점들의 모임이 등전위선으로 되는가?
2. 검류계를 쓰지 않고 수화기를 리용하여 등전위선을 찾을수 있는가?
이때 어떤 전원을 써야 하는가?
3. 전도성종이대신 전해질용액을 리용하는 실험장치를 그려보아라.

실험 2. 금속의 비저항측정

목적. 이 실험에서는 금속도선의 저항공식과 옴의 법칙을 리용하여 도선의 비저항을 측정한다.

기초지식. 금속도선에 전류가 흐를 때 저항공식 $R=\rho\dfrac{\ell}{S}$과 옴의 법칙 $I=\dfrac{U}{R}$을 리용하면 다음과 같은 비저항공식을 얻는다.

$$\rho=\frac{\pi D^2U}{4\ell I}$$

여기서 D와 ℓ은 금속도선의 직경과 길이이고 U와 I는 도선에 걸어준 전압과 전류의 세기이다.

이로부터 주어진 량들을 측정하면 비저항을 구할수 있다.

기구 및 재료. 길이가 각각 60cm이고 직경이 각각 0.2∼0.4mm정도인 니크롬선과 망가닌선을 늘인 절연판대기(그림 3), 직류전원장치(6V), 직류전압계(6V), 직류전류계(1A), 스위치, 마이크로메터, 자, 련결선, 가변저항기, 방안지

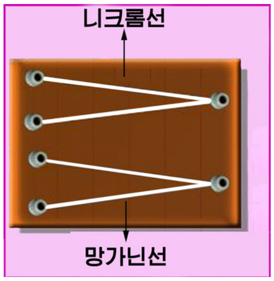
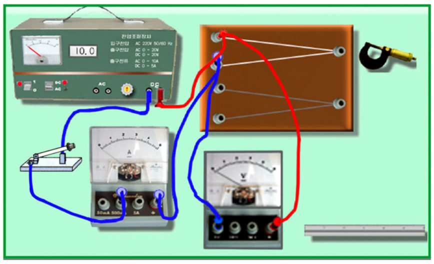


그림 3. 니크롬선과 망가닌선을 늘인 절연판대기

실험방법

1) 먼저 절연판대기에서 니크롬선을 선택하고 그림 4와 같이 회로를 잇는다. 이때 스위치 K를 열어놓은 상태에서 저항에 걸리는 전압이 령이 되도록 전원장치의 전압조절손잡이를 돌려놓는다. 전압계는 될수록 내부저항이 큰것을 써야 한다. 그리고 전원장치에 전압조절기가 없으면 가변저항기로 전압을 조절한다.


그림 4. 금속의 비저항측정장치

2) 니크롬선의 길이 ℓ와 직경 D를 자와 마이크로메터로 3회정도 측정하여 그의 평균값을 표에 기록한다.
3) 회로의 스위치를 닫고 전압조절손잡이를 돌려 전류가 200mA정도 되게 한다. 이때 계기에 나타난 전류의 세기와 전압을 표에 기록한다.
4) 전압조절손잡이를 돌려 전류의 세기를 30mA씩 줄이면서 전류의 세기와 전압을 재여 기록한다.
5) 같은 방법으로 망가닌선에 회로를 잇고 회로에 흐르는 전압과 전류의 세기, 길이와 직경을 측정하여 기록한다.

결과 및 분석

1) 다음의 표에 매 도선들에서 측정된 값들을 기록하고 비저항을 구한다.

도선종류	실험 번호	U[V]	I[A]	ℓ [m]	D[m]	ρ [Ω·m]	$\bar{\rho}$ [Ω·m]
니크롬선	⋮						
망가닌선	⋮						

2) 측정자료에 기초하여 U-I그라프를 그리고 도선에서 옴의 법칙이 성립하는가를 따진다.(그림 5)
3) 측정에서 구한 비저항값의 절대오차, 상대오차를 구하고 교과서의 표에 나온 값과 비교한 다음 오차원인을 밝힌다.

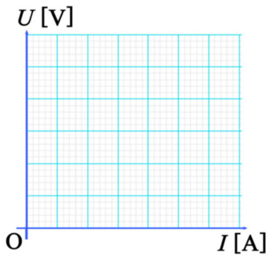


그림 5. U-I 그라프

과제

1. 스위치를 넣기 전에 전압조절손잡이를 돌려 전압을 왜 최소로 놓아야 하는가?
2. 실험에서 왜 전압계를 내부저항이 큰것을 써야 하는가?
3. 실험에서 저항을 측정할 때 전류의 세기는 될수록 작게 하여야 한다. 왜 그런가?

실험 3. 금속의 저항과 온도사이관계 연구

목적. 이 실험에서는 금속도선의 저항과 온도와의 관계를 알아보고 저항온도결수를 결정한다.

기초지식. 금속의 저항은 온도가 높아짐에 따라 커진다.

$$R = R_0(1+\alpha t) \qquad (1)$$

여기서 R_0은 0℃일 때의 저항, α는 저항온도결수이다.

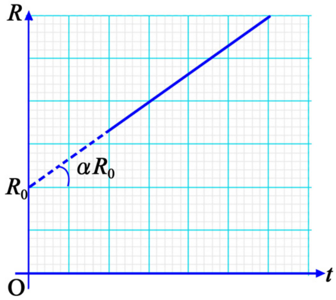


그림 6. 온도에 따르는 저항변화그라프

금속의 저항온도결수는 우의 공식으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha = \frac{R-R_0}{R_0 t} \qquad (2)$$

여기서 R_0은 온도에 따르는 저항그라프를 그리고 그라프의 직선을 연장하여 R축과의 사귐점을 찾으면 구할수 있다.(그림 6)

기구 및 재료. 휘스톤다리(그림 7), 금속저항체(작은 사기원통에 직경이 0.2mm이하인 동선을 30Ω정도 되게 감은것), 련결선, 알콜등, 비커, 변압기기름, 젓개, 방안지


그림 7. 휘스톤다리

실험방법

1) 금속저항체, 온도계, 젓개를 변압기기름속에 잠그고 비커밑에는 알콜등을 설치한다.
2) 금속저항체의 두 단자와 휘스톤다리의 R_x의 두 단자사이에 련결선을 잇는다.(그림 8)
3) 휘스톤다리의 저항척도돌리개를 0.01자리에 놓는다. 그러면 저항값은 소수점아래 2자리까지 정확히 측정할수 있다.


그림 8. 온도에 따르는 저항측정장치

4) 휘스톤다리의 《전원》스위치를 누르면서 약간 돌린다.(이때 전원이 투입된다.) 단추 《대략》을 눌러 검류계의 바늘이 움직이는것을 보면서 휘스톤다리의 비교저항을 높은 단계의 저항값부터 낮은 단계로 내려오면서 조금씩 변화시켜 검류계의 바늘이 0근방에 가게 한다.

5) 단추 《정확》을 누르다. 이때 검류계의 바늘이 0눈금에서 벗어난다. 아래단계의 비교저항을 조금씩 변화시켜 바늘이 0눈금에 오도록 한다.

6) 알콜등으로 비커를 가열하면서 젓개를 계속 젓는다. 그리고 온도가 90℃ 될 때까지 가열하되 온도가 10℃씩 올라갈 때마다 알콜등을 치우고 비교저항값을 변화시키면서 주어진 온도에서 저항값을 측정하여 기록한다.

※ 90℃까지 련속 가열한 다음 알콜등을 없애고 비교저항값을 맞추어 검류계바늘이 0눈금에 가게 한 다음 비교저항값을 미리 등간격으로 약간씩 낮추어놓고 검류계바늘이 0눈금이 될 때까지 기다렸다가 그 순간의 온도와 저항값을 기록할수도 있다.

결과 및 분석

1) 측정값을 다음의 표에 기록한다.

실험번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t [℃]										
R [Ω]										

2) 온도에 따르는 저항변화그라프를 그린다.(그림 9) 그라프를 통하여 무엇을 알수 있는가? 그라프에서 얻어진 직선의 연장선이 R축과 사귀는 점을 찾아 R_0 값을 구한다.

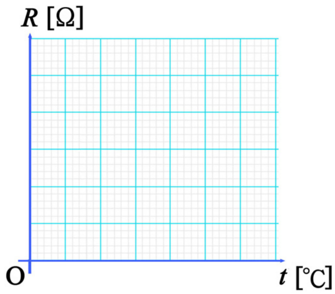


그림 9. 온도에 따르는 저항변화그라프

3) 직선의 경사도 $\tan\theta = \dfrac{R - R_0}{t}$ 를 결정하고 저항온도결수 α 를 결정한다.

$$\alpha = \frac{\tan\theta}{R_0}$$

4) 실험에서 측정된 저항온도결수값과 교과서의 표값을 서로 비교하고 오차원인을 찾는다.

과 제

1. 실험에서 전류계와 전압계를 쓰지 않고 휘스톤다리를 쓰는것은 무엇때문인가?
2. 실험에서 변압기기름대신 물이나 다른 기름을 쓰면 안되는가?
3. 밖에는 눈이 오고 집안은 덥다. 온도계를 쓰지 않고 축전지, 전압계, 전류계, 동선을 가지고 방안온도를 결정하여라.

실험 4. 휘스톤다리에 의한 저항측정

목적. 이 실험에서는 휘스톤다리를 리용하여 도체의 저항을 정확히 측정하는 방법을 익힌다.

기초지식. 그림 10과 같은 휘스톤다리에서 정확히 알고있는 저항을 R_0, 모르는 저항을 R_x 라고 할 때 검류계에 전류가 흐르지 않는 평형상태에서는 다음의 관계식이 선다.

$$R_x = R_0 \frac{\ell_2}{\ell_1}$$

이로부터 길이 ℓ_1, ℓ_2 을 재면 모르는 저항의 값을 정확히 잴수 있다.

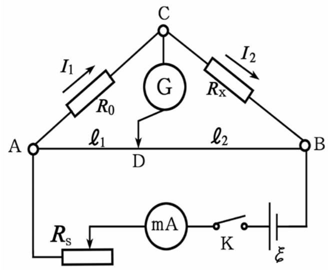


그림 10. 휘스톤다리회로

기구 및 재료. 니크롬선(길이 60cm)을 고정시킨 판대기, 자, 저항함, 모르는 저항(2개), 검류계, 직류전원(건전지 1.5V), 테스타, 스위치

실험방법

1) 모르는 저항 R_{x1} 을 택하고 그림 11과 같이 스위치를 열어놓고 회로를 잇는다. 이때 R_{x1} 를 련결하기 전에 미리 테스타로 R_{x1}, R_{x2} 의 값들을 대략 측정한다. 그리고 그의 값들에 가깝게 저항함 R_0 의 값을 맞추어놓는다.

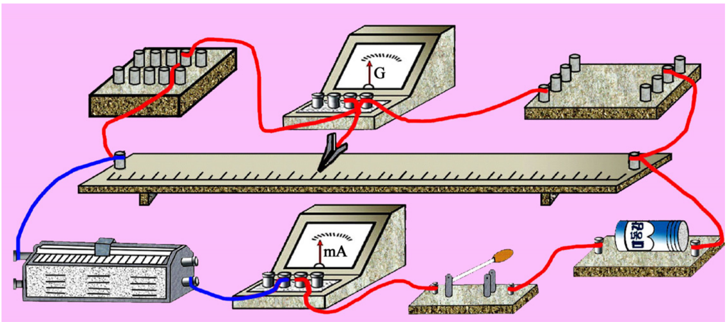


그림 11. 휘스톤다리에 의한 저항측정회로

2) 스위치 K를 닫고 검류계에 련결된 접점 D를 천천히 좌우로 움직이면서 검류계의 바늘이 령이 되는 점을 찾아 길이 ℓ_1, ℓ_2 을 측정한다.
3) 저항함의 저항 R_0 의 값을 조금 변화시켜놓은 다음 우와 같이 검류계바늘이 령을 가리키는 점을 찾아 길이를 측정하는 동작을 4회정도 반복한다.
4) 스위치 K를 열고 모르는 저항 R_{x2}을 바꾸어놓은 다음 저항함의 저항을 대략 맞추어놓고 실험 2~3의 과정을 반복한다.
5) R_{x2}, R_{x1} 을 직렬로 잇고 그의 저항을 R_{x3} 으로 하고 우와 같은 실험을 반복한다.

결과 및 분석

1) 측정된 값들을 다음의 표에 기록하고 저항을 구한다.

모르는 저항	실험 번호	R_0 [Ω]	ℓ_1 [mm]	ℓ_2 [mm]	$R_x = R_0 \frac{\ell_2}{\ell_1}$
R_{x1}	⋮				
R_{x2}	⋮				
R_{x3} [직렬]	⋮				

2) 모르는 저항 R_{x1}, R_{x2} 그리고 R_{x3}에 대하여 평균값, 절대오차, 상대오차를 각각 구하고 오차원인을 밝힌다.

3) 개별적으로 측정된 R_{x1}, R_{x2}의 합이 R_{x3}과 같은가를 비교한다.

4) 실험에서 찾은 결론과 느낀 점을 기록한다.

과 제

1. 저항을 휘스톤다리로 잴 때와 테스타로 직접 재거나 전압계, 전류계로 잴 때 어느 방법이 정확한 값을 측정하겠는가? 그 리유는 무엇인가?
2. R_0과 R_x값의 차이가 너무 크면 어떤 결과가 얻어지겠는가?
3. 검류계에 전류가 흐르지 않은 상태에서 접점 D를 A 혹은 B쪽으로 옮기면 검류계의 바늘이 어느쪽으로 움직이겠는가? 왜 그런가를 따져보아라.

실험 5. 보상법에 의한 전지의 전동력측정

목적. 이 실험에서는 전지의 전동력을 보상법에 의하여 표준전지와 비교하는 방법으로 측정한다.

기초지식. 그림 12와 같이 보상법에 의한 전동력측정회로에서 표준전지의 전동력을 $\mathscr{E}_0$, 모르는 전지의 전동력을 $\mathscr{E}_x$라고 하면 검류계에 전류가 흐르지 않는 평형상태에서 다음의 식이 성립한다.

$$\mathscr{E}_x = \mathscr{E}_0 \frac{\ell_x}{\ell_0}$$

이로부터 표준전지와 모르는 전지의 전동력이 각각 보상될 때 길이 ℓ_0, ℓ_x를 측정하면 $\mathscr{E}_x$를 구할수 있다.

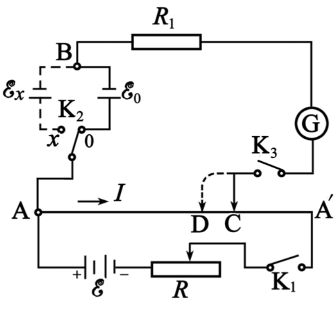


그림 12. 보상법회로

기구 및 재료. 축전지 혹은 직류전원(4.5V), 가변저항기, mm눈금이 있는 판에 고정된 저항선(길이 60cm), 표준전지(1.1V), 전동력을 모르는 전지 2개(임의의 건전지), 검류계, 검류계보호저항(100Ω), 스위치 2개(그중 한개는 2중스위치), 련결선

실험방법

1) 그림 13과 같이 스위치를 모두 열어놓은 상태에서 회로를 잇는다. 여기서 축전지의 전동력은 표준전지와 재려는 전지의 전동력보다 커야 하며 전지의 극성은 A점에 양극이 모두 련결되도록 이어야 한다.

2) 스위치 K_1를 먼저 닫고 K_2을 $\mathscr{E}_0$쪽으로 닫는다. 그리고 검류계의 바늘이 약하게 움직이는 근방을 찾아 C의 자리를 조금씩 옮기면서 검류계에 전류가 흐르지 않을 때의 A점과 보상점 C까지의 길이 ℓ_0을 측정한다. K_2을 열었다가 다시 닫고 $\mathscr{E}_0$에 대한 보상점을 3회 반복하여 ℓ_0을 측정한다.

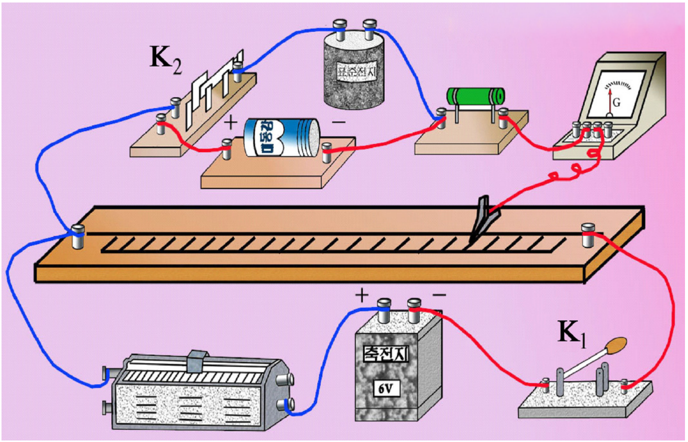


그림 13. 보상법에 의한 전지의 전동력 측정회로

3) 스위치 K_2을 $\mathscr{E}_{x1}$쪽으로 닫고 검류계에 전류가 흐르지 않는 점 D를 찾아 니크롬선 AD부분의 길이 ℓ_{x1}을 측정한다. 측정을 3회 반복한다.

4) 스위치 K_1, K_2를 열고 모르는 전지의 전동력 $\mathscr{E}_{x2}$로 바꾸고 스위치들을 닫은 상태에서 우와 같은 방법으로 ℓ_{x2}을 3회 측정한다.

5) 다시 스위치 K_1, K_2를 열고 $\mathscr{E}_{x2}$에 $\mathscr{E}_{x1}$를 직렬로 련결한 다음 그의 전동력을 $\mathscr{E}_{x3}$이라고 하고 우와 같은 방법으로 ℓ_{x3}을 3회 측정한다.

결과 및 분석

1) 측정된 값들을 다음의 표에 기록하고 계산한다.
표준전지의 전동력은 $\mathscr{E}_0$=1.1V이다.

$\mathscr{E}_{x1}$에 대한 측정

실험 번호	ℓ_0 [mm]	ℓ_{x1} [mm]	$\mathscr{E}_{x1}=\mathscr{E}_0\dfrac{\ell_{x1}}{\ell_{x0}}$ [V]
⋮			

$\mathscr{E}_{x2}$에 대한 측정

실험 번호	ℓ_0 [mm]	ℓ_{x2} [mm]	$\mathscr{E}_{x2}=\mathscr{E}_0\dfrac{\ell_{x2}}{\ell_{x0}}$ [V]
⋮			

$\mathscr{E}_{x3}$에 대한 측정

실험 번호	ℓ_0 [mm]	ℓ_{x3} [mm]	$\mathscr{E}_{x3}=\mathscr{E}_0\dfrac{\ell_{x3}}{\ell_{x0}}$ [V]
⋮			

2) 측정에서 구한 $\mathscr{E}_{x1}$, $\mathscr{E}_{x2}$, $\mathscr{E}_{x3}$에 대한 평균값, 절대오차, 상대오차를 구하고 오차원인을 밝힌다.
3) $\mathscr{E}_{x3}=\mathscr{E}_{x1}+\mathscr{E}_{x2}$의 관계가 성립하는가 따져보고 실험에서 얻은 결론과 느낀 점을 기록한다.

과 제

1. 우의 실험에서 AA′부분의 전압강하가 $\mathscr{E}_0$과 $\mathscr{E}_x$보다 작으면 어떻게 되겠는가?
2. 그림 12에서 검류계보호저항 R_1가 없어도 되겠는가?
3. 그림 12에서 $\mathscr{E}_x$와 $\mathscr{E}_0$의 극성을 바꾸면 어떤 현상이 일어나겠는가?

실험 6. 전자기유도현상 연구

목적. 이 실험에서는 전자기유도현상, 전자기유도법칙, 렌쯔의 규칙을 확증한다.

기초지식. 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 변하면 유도전류가 흐르며 이때 생기는 유도전동력의 크기는 자력선묶음의 변화속도에 비례한다.

$$\mathscr{E}=N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

여기서 유도전동력은 자력선묶음을 변화시키는 방법이나 요인이 무엇인가에 관계되지 않으며 닫긴회로에 유도전류를 흐르게 한다. 유도전류의 세기가 크면 유도전동력도 크다. 유도전류는 자력선묶음의 변화를 방해하는 방향으로 흐르며 방향은 렌쯔의 규칙 혹은 오른손의 규칙에 의하여 결정한다.

기구 및 재료. 막대기영구자석, 유도선륜(권회수가 서로 다른 큰 선륜 2개와 그안에 들어갈수 있는 작은 선륜 1개), 검류계, 전원(건전지 혹은 축전지), 스위치, 련결선, 소금물

1. 전자기유도현상에 관한 실험

실험방법

1) 유도선륜과 검류계로 그림 14와 같이 회로를 구성한다.
2) 막대기자석과 유도선륜이 다음과 같이 움직일 때 검류계의 바늘이 어떻게 움직이는가를 살펴본다.
   (1) 막대기자석을 선륜속에 넣을 때
   (2) 선륜속에서 막대기자석을 움직이지 않거나 돌릴 때
   (3) 막대기자석을 선륜속에서 뽑을 때
   (4) 막대기자석을 수직으로 세워놓고 그속에 선륜을 넣을 때
   (5) 막대기자석에 넣은 선륜을 움직이지 않거나 돌릴 때
   (6) 선륜을 막대기자석에서 뽑을 때

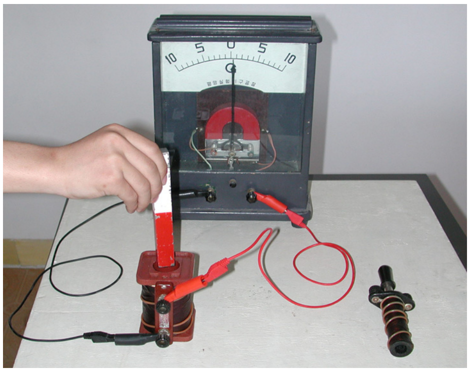


그림 14. 전자기유도현상 실험장치

결과 및 분석

1) 실험결과를 다음의 표에 기록한다.

구 분 / 검류계	자석이 이동할 때			선륜이 이동할 때		
	넣을 때	정지 혹은 돌릴 때	뽑을 때	넣을 때	정지 혹은 돌릴 때	뽑을 때
바늘이 움직이는가						

2) 실험을 통하여 유도전류는 어떤 때 흐르는가를 따진다.

2. 전자기유도법칙에 관한 실험

실험방법

검류계와 련결된 선륜에 자석을 다음과 같이 이동시킬 때 검류계의 바늘이 움직이는 정도를 살펴본다.

1) 선륜속에 자석을 빨리 혹은 천천히 넣을 때
2) 선륜속에 있는 자석을 빨리 혹은 천천히 뽑을 때

3) 선륜을 권회수가 본래의것보다 더 큰 선륜으로 바꾸고 우와 같은 실험을 반복하면서 검류계의 바늘이 움직이는 정도를 비교하여본다.

⚠ 자석을 움직이는 정도는 두 경우에 같이 해야 한다. 그리고 권회수가 큰 선륜을 본래의 선륜과 도선을 감은 방향이 같도록 직렬로 련결하고 할수도 있다.

결과 및 분석

1) 실험결과를 다음의 표에 기록한다.

자석상태 / 검류계		빨리 넣을 때	천천히 넣을 때	빨리 뽑을 때	천천히 뽑을 때
바늘이 움직이는 정도	권회수가 작을 때				
	권회수가 클 때				

2) 검류계바늘이 움직이는 정도 즉 유도전류의 세기가 클수록 유도전동력이 크다고 말할수 있는가?

3) 우의 실험결과로부터 유도전동력의 크기는 무엇에 관계되는가?

3. 렌쯔의 규칙에 대한 실험

실험방법

1) 검류계에서 바늘이 돌아가는 방향과 전류의 방향사이관계를 조사하여 검류계에 극성을 표시한다. 이를 위하여 건전지, 소금물, 검류계로 그림 15와 같이 회로를 구성한다.

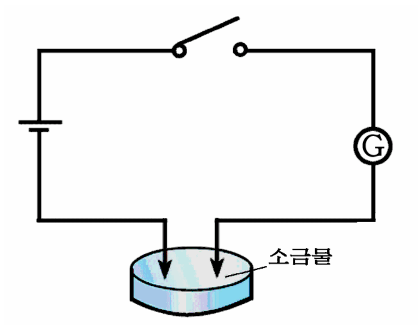


그림 15. 검류계에서 전류의 방향결정

2) 도선의 감은 방향을 선륜들의 밖에 표시한 다음 그림 14와 같이 회로를 련결한다.

3) 막대기자석의 N극을 선륜속에 넣을 때와 뽑을 때 검류계의 바늘이 어느쪽으로 움직이는가를 관찰하고 선륜에서의 유도전류방향과 그에 의한 자기마당의 방향을 결정한다.

4) 자석의 S극을 선륜속에 넣을 때와 뽑을 때 우와 같이 유도전류의 방향과 자기마당의 방향을 결정한다.

5) 그림 16과 같이 작은 선륜(1차선륜)에 전원을 잇고 작은 선륜에서의 전류방향과 그에 따르는 자기마당의 방향을 살펴본다.(즉 전자석의 자극을 정한다.)

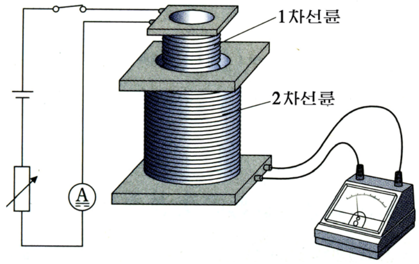


그림 16. 전자석에 의한 유도전류의 방향결정

6) 작은 선륜을 큰 선륜속에 넣거나 뽑을 때 큰 선륜에 생기는 유도전류의 방향을 결정한다.

7) 큰 선륜속에 작은 선륜을 넣고 스위치를 닫을 때와 열 때 큰 선륜에 생기는 유도전류의 방향을 살펴본다.

결과 및 분석

1) 실험결과를 다음의 표에 기록한다.

운동상태 / 관측대상	자석운동				작은 선륜운동			
	N극 넣을 때	N극 뽑을 때	S극 넣을 때	S극 뽑을 때	넣을 때	뽑을 때	스위치 닫을 때	스위치 열 때
자기마당 증가 혹은 감소								
유도전류방향								
유도전류에 의한 선륜의 자기마당방향								
운동 혹은 마당변화를 방해하는가 도와주는가								

2) 관측결과로부터 어떤 결론을 내릴수 있는가?

과제

1. 1차선륜에 전원과 가변저항기를 련결한 다음 전압을 증가 혹은 감소시킬 때 2차선륜에 유도전동력이 생기겠는가?
2. 그림 16에서 스위치를 닫고있는 상태에서 유도전류가 흐르지 않는다. 만일 이 상태에서 철심을 넣었다뽑았다하면 유도전류가 흐르겠는가? 왜 그런가? 실험을 해보고 대답하여보아라.

실험 7. 기체의 흐름량 결정

목적. 이 실험에서는 흐름관의 두곳에서 정압차를 측정하여 흐름관속으로 흐르는 기체의 흐름량을 측정한다.

기초지식. 흐름관을 수평으로 놓았을 때 베르누이정리와 흐름의 련속성의 정리를 리용하면 기체의 흐름량을 구할수 있다. 즉

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}, \qquad S_1 v_1 = S_2 v_2$$

흐름관의 임의의 두곳에서 정압차는 U자형압력계를 리용하여 $P_2 - P_1 = \rho_0 g \Delta h$ 로 구할수 있다.

이 두 방정식으로부터 흐름량은 다음과 같이 표시된다.

$$Q = S_1 v_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \sqrt{\frac{2g\rho_0 \Delta h}{\rho\left[1-(d_1/d_2)^4\right]}}$$

여기서 ρ와 ρ_0은 기체와 U자형압력계에 넣은 액체의 밀도이고 d_1, d_2은 자름면적이 S_1, S_2인 자리에서 흐름관의 직경이다. 그리고 Δh는 U자형압력계에서 액체기둥의 높이차이다.(그림 17)

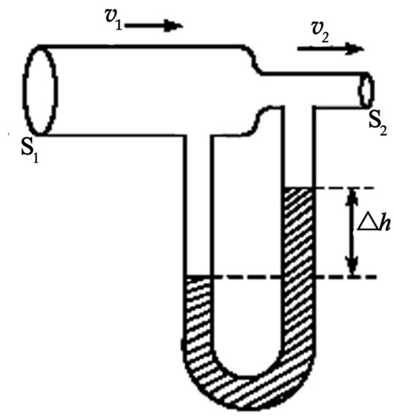
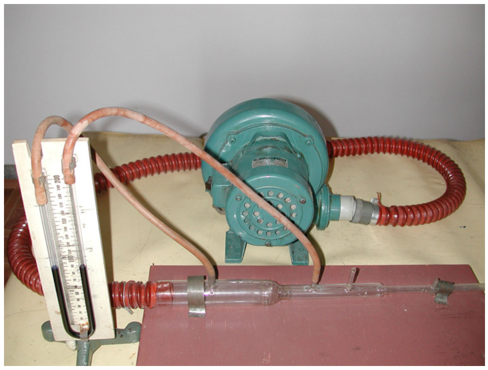


그림 17. 흐름관의 두곳에서 정압차

기구 및 재료. 송풍기, 변압기, 련결관, 흐름관, U자형압력계와 그에 붙은 고무관, 자, 노기스, 마이크로메터

실험방법

1) 송풍기와 흐름관을 련결관으로 잇는다.
2) 흐름관이 수평이 되도록 실험대우에 설치한 다음 마이크로메터로 흐름관의 두께 D를 측정한다.
3) U자형압력계에 물을 붓고 흐름관의 면적이 제일 좁은 부분과 그 이웃한 부분에 U자형압력계에 붙은 고무관을 잇는다.(그림 18)


그림 18. 기체의 흐름량측정장치

4) 송풍기에 전원을 넣고 송풍기의 전압을 서서히 증가시켜 기체의 흐름이 일정하도록 한다. 이때 흐름량을 갑자기 증가시키지 말아야 한다.
5) U자형압력계에서 액체기둥의 높이차 Δh를 측정한다.
6) 관의 외경 d_1'와 d_2'를 노기스로 측정한다. 이때 흐름관의 내경은 $d = d' - 2D$로 된다.
7) U자형압력계의 고무관을 제일 좁은 구멍에 꽂은것은 그대로 두고 다른 관을 이웃한 다른 구멍에 련이어 련결하면서 실험 5~6의 과정을 반복한다.

결과 및 분석

1) 측정된 량을 다음의 표에 기록하고 흐름량을 웃식에 의하여 구한다.

실험 번호	D[mm]	d_1' [mm]	d_2' [mm]	$d_1 = d_1' - 2D$	$d_2 = d_2' - 2D$	Δh [mm]	Q [m³/s]
⋮							

2) 흐름량 Q에 대한 평균값, 절대오차, 상대오차를 계산하고 오차원인을 밝힌다.
3) 실험에서 얻은 결과를 통하여 무엇을 알수 있는가?

과 제

1. 기체의 흐름속도를 높이면서 물기둥의 높이차를 관찰하여라. 여기서 무엇을 알수 있는가?
2 U자형압력계의 한끝을 넓은 관으로 점점 옮겨갈 때 물기둥의 높이차는 어떻게 되며 여기서 무엇을 알수 있는가?
3. 왜 기체의 속도를 갑자기 증가시키면 안되는가?
4. 원통모양의 호스로 체적을 알고있는 물을 완전히 채우는 시간을 구하려고 한다. 자만을 가지고 시간을 측정하여라.

실험 8. 흔들이에 대한 연구

목적. 이 실험에서는 흔들이의 주기가 무엇에 관계되는가를 따져보고 주기와 실의 길이를 재여 중력가속도를 결정한다.

기초지식. 질점흔들이의 고유진동주기식으로부터 중력가속도 g는 다음과 같다.

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2}\ell$$

이로부터 흔들이의 고유주기 T와 흔들이의 길이 ℓ를 측정하면 중력가속도를 구할수 있다.

기구 및 재료. mm자, 추(질량이 다른것 3개), 표시판, 초시계, 고정대, 실(1m), 노기스, 방안지

실험방법

1) 그림 19와 같이 실험장치를 설치한다.
흔들이의 길이를 1m로 되게 하고 드림선방향으로 드리운 상태에서 실의 평형자리에 표시판을 가져다놓는다.
2) 흔들이의 진폭과 주기사이의 관계를 따진다.
(1) 흔들이가 평형자리로부터 5cm 벌어지게 추를 왼쪽으로 기울였다가 놓아준다. 흔들이가 표시판의 기준선을 오른쪽 방향으로 지나는 순간에 초시계를 누르고 흔들이가 진동하면서 오른쪽 방향으로 기준선을 지날 때마다 셈세기를 하여 20회 될 때 초시계를 멈춘다. 이때 주기를 결정한다.



그림 19. 질점흔들이장치

(2) 흔들이가 평형자리로부터 10cm, 15cm 벌어지게 하였을 때 우와 같은 방법으로 각각 주기를 측정하여 기록한다.

3) 흔들이의 주기와 추의 질량사이관계를 따진다.

(1) 흔들이의 추를 질량이 다른것으로 바꾸어 길이가 1m인 흔들이를 만든다. 여기서 추를 바꿀 때마다 추의 중력중심까지의 거리가 꼭 1m 되도록 해야 한다.

(2) 매번 흔들이를 평형자리로부터 10cm정도 벌어지게 한 다음 우와 같은 방법으로 주기를 결정한다.

4) 흔들이의 주기와 길이사이의 관계를 조사한다.

(1) 노기스로 추의 직경을 재고 그의 반경을 구한 다음 추를 매단 점까지의 실의 길이를 정확히 재여 흔들이의 길이를 정한다.

(2) 흔들이의 길이가 1m, 0.8m, 0.6m, 0.4m인 경우에 우와 같은 방법으로 주기를 측정한다.

결과 및 분석

1) 흔들이의 진폭과 주기사이의 관계

실험번호	진폭[cm]	n	t[s]	$T=\frac{t}{n}$
⋮				

2) 흔들이의 주기와 추의 질량사이관계

실험번호	m[kg]	n	t[s]	$T=\frac{t}{n}$
⋮				

3) 흔들이의 주기와 길이사이관계

(1) 실험자료를 표에 기록한 다음 중력가속도를 구한다.

실험번호	ℓ [m]	n	t[s]	$T=\frac{t}{n}$	T^2	$g=\frac{4\pi^2}{T^2}\ell$
⋮						

(2) 주기의 두제곱과 흔들이의 길이사이의 관계그라프(그림 20)를 그리고 경사도 $\tan\alpha=\ell/T^2$를 구한다. 이로부터 식 $g=4\pi^2\tan\alpha$에 의하여 중력가속도값을 구한다.

(3) 표에서 구한 중력가속도 g의 평균값, 절대오차, 상대오차를 구한 다음 오차원인을 밝히고 그라프에서 얻은 값과 비교한다.

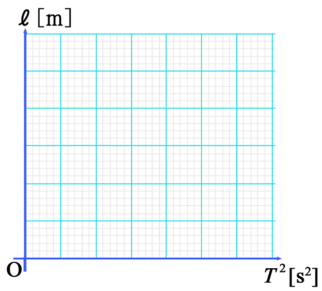


그림 20. 주기의 두제곱과 흔들이의 길이사이의 관계그라프

과제

1. 흔들이의 기울어짐각이 너무 크면 실험에서 오차가 커진다. 왜 그런가?
2. 가는 실과 시계, 자그마한 추를 가지고 방안의 체적을 결정하여라.

실험 9. 선륜의 유도결수 측정

목적. 이 실험에서는 선륜의 옴저항과 교류에 대한 완전저항을 측정하여 선륜의 유도결수를 결정한다.

기초지식. 교류회로에서 선륜은 유효저항과 유도저항을 직렬로 이은 회로와 같다.(그림 21) 그러므로 각주파수가 ω 인 교류에 대한 선륜의 완전저항은 다음과 같다.

$$Z=\sqrt{R^2+(\omega L)^2} \qquad (1)$$

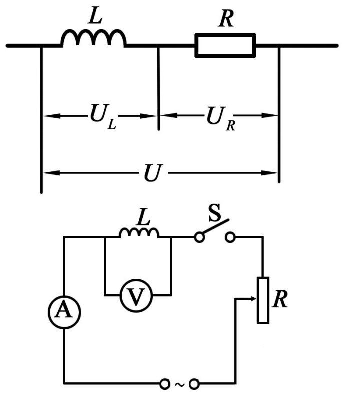


그림 21. 선륜의 유효저항과 유도저항

선륜의 완전저항은 선륜에 걸린 교류전압과 여기에 흐르는 전류를 측정하여 구할수 있다.

즉
$$Z=\frac{U}{I} \qquad (2)$$

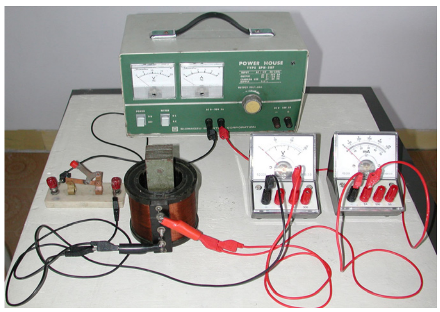
그리고 R는 저항계 혹은 직류전압계와 직류전류계를 리용하여 결정할수 있다. 이로부터 선륜의 유도결수는 다음의 식에 의하여 구할수 있다.

$$L=\frac{\sqrt{Z^2-R^2}}{\omega} \qquad (3)$$

기구 및 재료. 선륜, 철심, 교류용전압계와 전류계, 저항계, 교류전원(60Hz), 스위치, 련결선, 주파수계

실험방법

1) 저항계로 선륜의 유효저항 R를 측정한다. 저항계대신 직류전원, 직류용전압계와 전류계를 리용하여 측정할수도 있다.
2) 그림 22와 같이 스위치를 열어놓은 상태에서 회로를 잇는다. 이때 교류전원장치의 전압조절손잡이를 최소상태로 돌려놓는다.


그림 22. 선륜의 유도결수측정회로

3) 전원스위치를 넣고 스위치를 닫는다. 전압조절손잡이를 천천히 돌려 선륜에 걸어준 전압 U에 따르는 전류의 세기 I를 측정한다.
4) 전압조절손잡이를 돌려 전압을 최소상태로 놓고 선륜에 철심을 넣은 다음 우와 같은 방법으로 선륜에 걸리는 전압 U에 따르는 전류의 세기 I를 측정한다.
5) 주파수계로 교류전원의 주파수 v를 측정한다.(실험실 배전반의 주파수계를 리용할수도 있다.)

결과 및 분석

1) 측정값을 다음의 표에 기록하고 유도결수를 구한다.

측정 / 상태	실험 번호	R[Ω]	v[Hz]	U[V]	I[A]	$Z=\frac{U}{I}$	L[H]
철심이 없을 때	⋮						
철심이 있을 때	⋮						

2) 철심이 있을 때와 없을 때 유도결수의 평균값, 절대오차, 상대오차를 각각 구하고 오차원인을 밝히고 느낀 점을 쓴다.

과 제

1. 선륜에 철심을 넣으면 L의 값이 어떻게 변하는가? 그것은 무엇때문인가?
2. 실험에서 얻은 L의 값과 표준 L, R, C측정기로 측정된 L의 값을 비교하여보아라.

실험 10. 전자선오씰로그라프의 조종

목적. 이 실험에서는 전자선오씰로그라프의 조절손잡이들의 기능을 파악하고 그의 사용법을 익힌다.

기초지식. 《오 5-10》전자선오씰로그라프의 주요구성도는 그림 23과 같다.

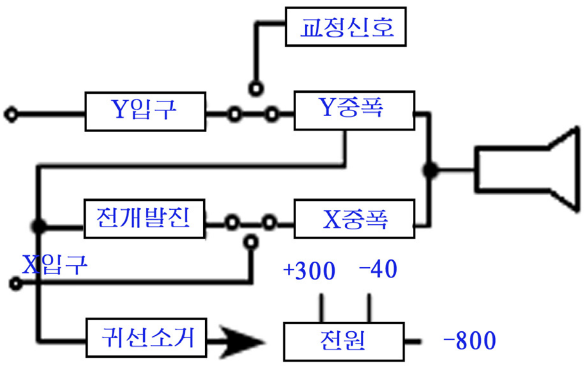


그림 23. 《오 5-10》전자선오씰로그라프의 주요구성도

측정하려는 신호는 《Y입구》에서 《Y증폭》으로 들어가서 증폭된 다음 수직편향판에 걸리며 전자선을 Y

축방향으로 움직이게 한다. 전개신호는 《X증폭》에서 증폭된 다음 전자선관의 X축 편향판에 걸리여 시간축으로 된다.

전자선관에서 전자선은 Y축, X축방향의 2개 전위의 영향을 받아 형광막에 측정하려는 신호의 파모양을 나타낸다. 조절손잡이들의 기능은 다음과 같다.

밝기: 전자선관의 형광막에 나타나는 신호점의 밝기를 조절한다.

초점: 형광막에 나타나는 신호점의 초점을 조절한다.

보조초점: 초점조절기와 배합하여 신호점을 하나의 선명한 작은 원점으로 만들도록 한다.

Y입구: 수직편향판에 측정하려는 신호를 들여보내는 접속구이다.

Y감쇠: 들어오는 Y축신호의 크기에 따라 수직편향판 전압을 감쇠하기 위한 척도로서 3단(1:10:100)으로 되여있다.

Y증폭: 형광막에 나타난 신호파형의 진폭을 Y축방향으로 조절하는 세밀조절기이다.

Y이동: 신호파형의 전개 혹은 Y축방향으로 움직이도록 조절하는 조절손잡이이다.

X입구: 외부신호에 의해 X축편향을 시키려고 할 때 넣어주기 위한 입구단자이다.

X증폭: X축의 전개길이를 조절하기 위한 조절손잡이이다.

전개주파수: 전개신호의 톱날파주파수를 변화시키기 위한 조절손잡이이다.

세밀조절: 톱날파주파수를 보다 좁은 범위에서 세밀조절하는 손잡이이다.

동작상태: 동기방식을 조절한다. 즉《내부》에 놓으면 동기신호를 Y증폭에,《전원》에 놓으면 전원주파수신호를 X증폭에, 《X입구》에 놓으면 X입구단자로부터 신호를 받아 X증폭에 들여보내여 동기방식을 조절한다.

기구 및 재료. 《오 5-10》전자선오씰로그라프(그림24), 교류전원(3V), 련결선(다른 오씰로그라프를 쓰는 경우에는 그에 대한 사용설명서를 보아야 한다.)

실험방법

1) 전자선오씰로그라프의 조절요소들을 안전상태로 돌린다. 《전원》손잡이는 아래로, 《밝기》,《X증폭》손잡이는 왼쪽 끝에, Y감쇠손잡이는 《100》의 자리에 놓는다.
2) 전원을 넣고 50s정도 지나서 형광막에 나타난 신호점의 밝기와 초점을 보기에 알맞춤하게 조절한다.
3) Y증폭의 동작을 검열한다.
   (1) 《Y감쇠》를 《교정》자리에 돌린다. 그러면 교류 60Hz, 6V의 교류전원신호를 《Y증폭》에 이어준다.



그림 24.《오 5-10》전자선오씰로그라프

(2) 《Y증폭》을 오른쪽으로 돌리면서 신호점이 Y축방향으로 선분을 그리게 하고 《Y감쇠》를 《10》, 《1》의 자리로 절환하면서 선분의 길이를 관측한다.

4) 전개발진기의 동작을 검열한다.

(1) 교정신호를 《Y증폭》에 이은 상태에서 《동작상태》를 《내부》에 돌리고 《전개주파수》를 《10~100》의 대역에 놓고 《전개세밀》을 돌려 전개전압을 동기시킨다. 동기가 정확히 되면 형광막에 흐르지 않는 시누스파모양이 생긴다.

(2) 《Y증폭》조절에 따라 진폭이 변하고 파모양이 이지러지지 않으면 교정이 잘 된것이다.

5) 《Y감쇠》를 《교정》에 놓고 《동작상태》를 《전원》에 놓으면 Y-입구와 X-입구에 60Hz의 교류전압이 걸리므로 형광막의 신호점은 타원을 그린다. 이때 《X증폭》을 조절하는데 따라 타원의 모양이 달라진다.

6) 《Y감쇠》를 《교정》에서 벗어나 《10》에 놓고 《동작상태》를 《내부》로 돌린 다음 《Y입구》와 접지사이에 전원전압(60Hz, 3V)을 넣어주고 《Y증폭》을 변화시키면서 《교정》상태에 놓았을 때의 신호파모양과 꼭같은 파모양이 나오는가를 관측한다.

결과 및 분석

오씰로그라프의 매 조절손잡이들의 조절에 따르는 관측결과와 그것이 어떤 작용에 의해 일어나는가를 밝힌다.

(밝기, 초점, Y 증폭, X 증폭, 전개주파수, 동작상태)

과 제

1. 다른 종류의 오씰로그라프의 사용설명서를 보고 조종하여보아라.
2. 전자선오씰로그라프의 전개주파수를 최소로 놓고 X증폭을 최소로 놓으면 형광막에는 하나의 점이 나타난다. 만일 말굽자석의 두 극이 형광막의 신호점에 수직으로 놓이도록 가져가면 신호점이 어떻게 움직이겠는가?

실험 11. 전기공진 연구

목적. 이 실험에서는 *R*, *L*, *C*가 직렬로 련결된 교류회로에서 유도저항과 용량저항이 같을 때 전기공진을 연구한다.

기초지식. *R*, *L*, *C*가 직렬로 련결된 교류회로에서 회로에 걸린 전압 *U*가 일정할 때 유도저항과 용량저항이 같으면 전류와 전압의 자리각은 같고 전류의 세기는 최대값을 가진다.

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

즉 공진전류는 회로의 유효저항 R가 작을수록 예리하다.(그림 25의 ㄱ)

이때 유도저항 ωL와 용량저항 $1/\omega C$이 같도록 하자면 ω와 L 혹은 C를 변화시켜야 한다.

실험에서는 ω와 C는 일정하게 하고 L을 변화시키면서(그림 25의 ㄴ) 회로에서 일어나는 전기공진을 관찰한다.

기구 및 재료. 선륜과 철심, 축전기, 가변저항기, 교류전류계(1A), 교류전압계(15V), 교류전원(60Hz), 스위치, 자, 련결선, 방안지

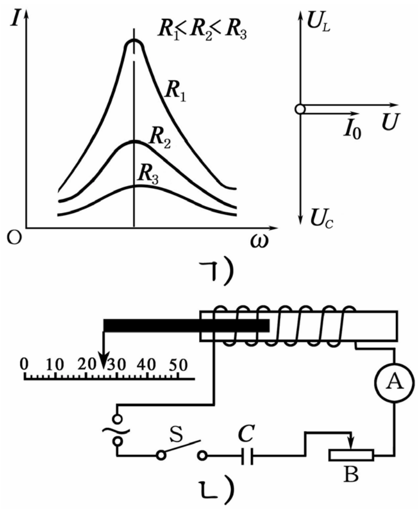
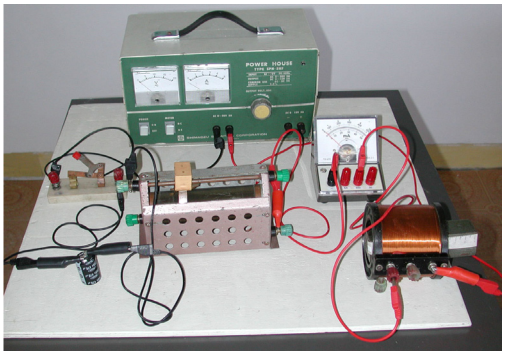


그림 25. 각주파수에 따르는 전류그라프

실험방법

1) 그림 26과 같이 회로를 잇는다. 그리고 선륜속에 철심을 조금 넣고 선륜속에 철심이 들어간 길이를 잴수 있게 mm자를 놓는다.
2) 가변저항기의 저항을 최대로 놓고 스위치를 닫는다.
3) 철심을 선륜속에 들이밀면서 철심이 들어간 길이 ℓ과 그에 해당한 전류의 세기 I를 측정한다.
   공진이 일어났을 때(전류의 세기가 최대인 때) 회로의 단자전압 U, 선륜에 걸린 전압 U_L, 축전기에 걸린 전압 U_C를 측정한다.
4) 철심을 뽑고 가변저항기의 저항을 2번 줄이고 매 경우에 우와 같은 실험을 반복한다.


그림 26. 전기공진실험회로

결과 및 분석

1) 측정결과를 다음의 표에 기록한다.

$R_1 < R_2 < R_3$	실험 번호	ℓ [mm]	U[V]	I_0[A]	U_L [V]	U_C [V]
R_1	⋮					
R_2	⋮					
R_3	⋮					

2) 측정된 값에 기초하여 전류의 세기 I와 길이 ℓ사이 관계그라프를 그린다.(그림 27)

3) 실험에서 얻은 결론을 기록한다.

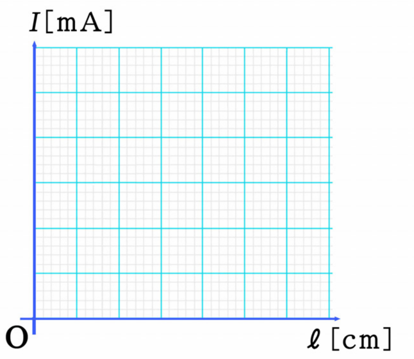


그림 27. 철심길이에 따르는 전류의 세기그라프

과제

1. 공진곡선에서 유효저항에 따라 공진의 최대전류가 어떻게 변하는가?
2. 공진이 일어날 때 U_L과 U_C의 값을 비교하면 값이 약간 차이난다. 그 리유는 무엇인가?
3. 왜 선륜에 철심을 깊이 넣는데 따라 L가 변하는가?

실험 12. 줄에서의 정상파 연구

목적. 이 실험에서는 줄을 따라 전파하는 파동이 반사파와 겹쳐 이루어지는 정상파를 관찰하고 파장이 무엇에 관계되는가를 밝힌다.

기초지식. 두끝이 고정된 줄에서 퍼져나가는 파동과 밴 매질의 경계에서 반사된 파동이 겹쳐 정상파를 이룰 때 파장은 다음과 같다.(그림 28)

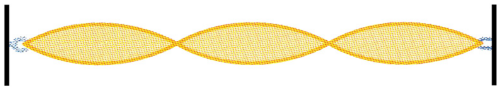


그림 28. 두끝이 고정된 줄에서의 정상파

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n} \quad (n=1,\ 2,\ 3\cdots) \tag{1}$$

한편 선밀도가 ρ인 줄을 장력 T로 당길 때 파장은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{1}{\nu}\sqrt{\frac{T}{\rho}} \tag{2}$$

기구 및 재료. 정상파관측장치(교류진동전자석과 진동판, 고정판, 반사판), 추(3개), 교류전원(60Hz), 가는 동선 혹은 실(1.5m), 천평

실험방법

1) 가는 동선(길이 10m)을 말아 천평으로 그의 질량을 3회정도 측정한다. 그리고 질량을 길이로 나누어 선밀도의 평균값을 얻는다.

2) 그림 29와 같이 정상파관측장치를 설치한다. 줄의 한끝은 진동판에 고정하고 다른 끝은 반사판과 도르래를 거쳐 추받치개에 걸어놓는다. 추받치개에는 추 1개를 올려놓고 반사판은 오른쪽 끝까지 밀어놓는다.

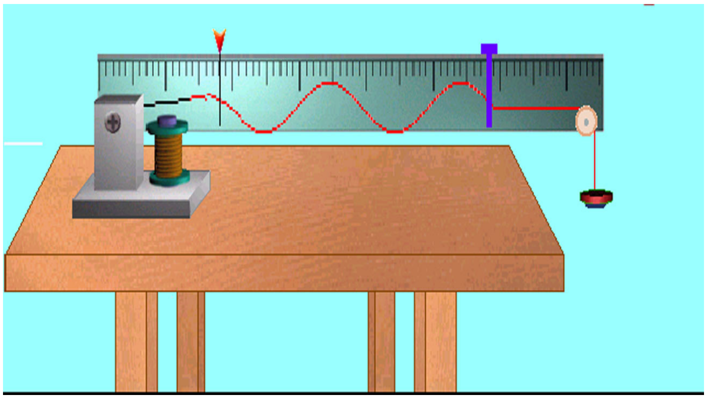


그림 29. 줄에서의 정상파실험장치

3) 실험실 배전반으로부터 교류전원주파수가 얼마인가를 확인하고 전원스위치를 닫아 진동을 일으킨다. 진동판의 한주기에 +, −경우에 두번 진동하므로 진동수는 교류주파수의 2배가 되여야 한다.
4) 반사판을 천천히 왼쪽으로 옮기면서 정상파가 이루어지도록 조절한다. 정상파가 이루어지면 이웃한 마디사이에 있는 매 점들의 진폭, 자리각을 따져본다. 그리고 배의 개수 n와 줄의 길이 ℓ을 측정하여 표에 기록한다.
5) 반사판을 천천히 왼쪽으로 옮기면서 배가 하나 남을 때까지 정상파가 이루어지는 배와 줄의 길이를 측정한다.
6) 추의 개수를 둘 또는 셋까지 늘이면서 매 경우에 우에서와 같은 실험을 반복한다.

결과 및 분석

1) 측정한 줄의 선밀도(ρ[kg/m])와 진동수(ν[Hz])를 각각 기록한다.
2) 실험에서 측정된 값들을 다음의 표에 기록하고 식 1, 2로부터 얻은 파장의 값들을 계산한다.

추의 개수	장력 T[N]	실험 번호	줄의 길이 ℓ[cm]	배의 개수 n	파장 $\lambda_n=\frac{2\ell}{n}$	평균파장 $\bar{\lambda}$	$\lambda=\frac{1}{\nu}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$
1		⋮					
2		⋮					
3		⋮					

3) $\overline{\lambda}$와 λ의 값들을 비교하고 오차원인을 밝힌다.
4) 같은 줄에서 v와 T가 일정할 때 파장이 줄의 길이에 관계되는가를 밝힌다.
5) 줄을 당기는 힘이 커질 때 파장이 어떻게 변하는가를 밝힌다.

과 제

1. 실험에서 관찰한 측정결과를 통하여 다음의 물음에 대답하여라.
   ㄱ) 이웃한 배와 마디사이의 간격은 어떤가?
   ㄴ) 이웃한 두 마디사이에 있는 점들은 어떤 자리각으로 떠는가?
   ㄷ) 마디점들은 어떤 자리각으로 떠는가?
2. 이 실험장치로부터 줄의 선밀도를 어떤 방법으로 결정할수 있겠는가?

실험 13. 공기기둥의 공명에 의한 소리의 파장 측정

목적. 이 실험에서는 공기기둥의 공명현상을 리용하여 소리의 파장과 진동수를 측정한다.

기초지식. 그림 30과 같이 한끝이 열린 관의 끝에서 음차를 진동시키고 관의 길이를 증가시킬 때 음차의 진동수와 관의 고유진동수가 같아질 때마다 공기기둥에서 공명이 일어난다.

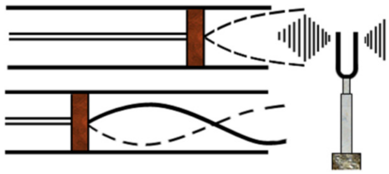


그림 30. 한 끝이 열린 공기기둥에서의 정상파

첫 공명이 일어날 때 관의 길이 ℓ_1, 다음번 공명이 일어날 때 관의 길이를 ℓ_2이라고 하면 다음의 관계가 성립한다.

$$\ell_2 - \ell_1 = \frac{\lambda}{2} \qquad (1)$$

이로부터 ℓ_1, ℓ_2을 측정하면 파장 λ를 결정할수 있다. 이때 소리의 전파속도를 v라고 하면 소리의 진동수는 다음과 같다.

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2(\ell_2 - \ell_1)} \qquad (2)$$

방안온도에서 소리의 전파속도는 다음과 같다.

$$v = 331.5 + 0.6t \ [\mathrm{m/s}] \qquad (3)$$

⚠ 공기기둥에서 정상파의 배는 정확히 열린 끝에 있지 않고 관 반경의 약 0.6배만큼 밖에 있다.

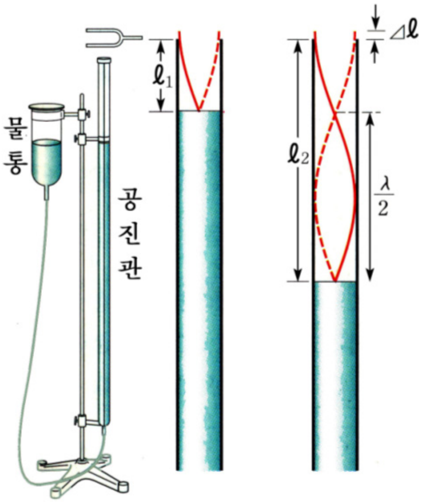


그림 31. 공기기둥에 의한 소리의 파장측정장치

기구 및 재료 공기기둥공명실험장치(유리관 1.2m, 련결관과 물통, 고정대), 음차(라음이상) 혹은 음성발진기와 고성기, 고무망치

실험방법

1) 그림 31과 같이 실험장치를 설치하고 공기기둥에 물을 부어넣는다. 물면은 유리관 웃끝으로부터 5cm정도 아래에 있을 때 물통의 바닥이 차는 정도로 되게 한다.
2) 음차를 고무망치로 때려 울리고(또는 음성발진기를 동작시켜 고성기가 울리게 하고) 물통을 천천히 아래로 내리면서 소리가 크게 들릴 때(첫 공명이 일어날 때)의 길이 ℓ_1을 측정한다.
3) 소리를 계속 울리게 하면서 물통을 천천히 더 내려 둘째, 셋째 공명이 일어날 때의 길이를 각각 측정한다.
4) 물통을 다시 우로 올리고 실험 2~3의 과정을 세번이상 반복한다.
5) 방안온도를 측정한다.

결과 및 분석

1) 측정된 방안온도값을 식 3에 넣어 소리의 속도(v[m/s])를 결정한다.
2) 측정된 실험값들을 다음의 표에 넣어 파장과 진동수를 구한다.

실험 번호	ℓ_1 [cm]	ℓ_2 [cm]	ℓ_3 [cm]	$2(\bar{\ell}_2-\bar{\ell}_1)=\lambda$ [cm]	$2(\bar{\ell}_3-\bar{\ell}_2)=\lambda$ [cm]	$\bar{\lambda}$ [cm]	$\bar{v}=\frac{v}{\bar{\lambda}}$
⋮							
평균값							

3) 실험에서 결정한 진동수값과 음차(혹은 저주파발진기)의 진동수값을 서로 비교하고 오차원인을 밝힌다.

과제

1. 실험에서 음차 혹은 발진기의 진동수를 작은것으로 하면 어떤 난점이 생기겠는가?
2. 우의 실험결과값을 가지고 $\ell_1=\frac{\lambda_1}{4}$ 와 $\ell_2-\ell_1=\frac{\lambda_2}{2}$ 의 두 식으로부터 구한 λ값을 각각 비교하면 어느것이 더 큰가? 그 리유는 무엇인가?

실험 14. 초단파의 특성 연구

목적. 이 실험에서는 초단파의 반사와 굴절, 간섭 그리고 전자기파가 가로파라는것을 확증한다.

기초지식. 초단파는 파장이 짧은 전자기파이다. 파장이 짧기때문에 지향성이 높고 빛과 같이 곧추 가며 반사, 굴절, 간섭과 에돌이를 나타낸다.

전자기파는 금속에서 잘 반사되지만 유전체에서는 잘 반사되지 않으며 굴절된다.

그리고 전자기파의 파장정도의 금속판틈을 지날 때 에돌이가 잘 나타나며 수신부를 놓으면 간섭현상을 확증할수 있다.

전자기파는 전파방향과 진동방향이 수직이므로 살창을 놓으면 살창면방향의 진동성분만 통과하므로 세기가 약해진다. 그러므로 전자기파의 파장정도의 금속살창을 지나는 파의 세기를 측정하여 가로파인가 세로파인가를 확증할수 있다.

기구 및 재료. 초단파발진기(λ=2cm정도), 한개 실틈이 있는 금속판, 두개 실틈(d=2cm정도)이 있는 금속판, 금속살창, 초단파수신기, 분도기, 곧은 동선 3개(길이 25cm정도, 직경 2mm), 삼각프리즘(파라핀 혹은 피치)

실험방법

1) 초단파의 반사와 굴절현상을 관찰한다.

(1) 금속판을 수직으로 세우고 발진기와 수신기를 그림 32와 같이 설치한다.

(2) 금속판의 가운데에 밑점을 정하고 경계면에 수직되게, 발진기와 잇는 입사선우에 곧은 동선을 각각 놓는다.

(3) 수신기의 수감부방향을 조금씩 돌리면서 반사파의 세기가 제일 클 때 수신부와 잇는 반사선우에 곧은 동선을 놓아 분도기로 입사각과 반사각을 각각 측정한다.

(4) 송신부의 입사각을 변화시켜 우와 같은 실험을 3회 반복한다.

(5) 굴절현상을 관측하기 위하여 금속판을 치우고 그림 33과 같이 파라핀으로 만든 삼각프리즘을 놓고 수신기를 조금씩 움직일 때 어떤 방향에서 세기가 제일 크게 되는가를 조사한다.

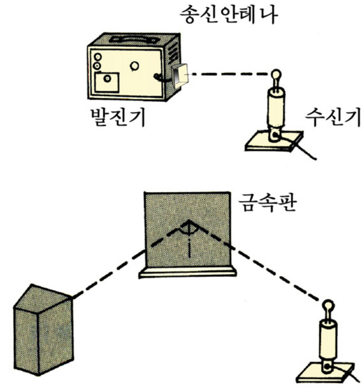


그림 32. 전자기파의 반사관측장치

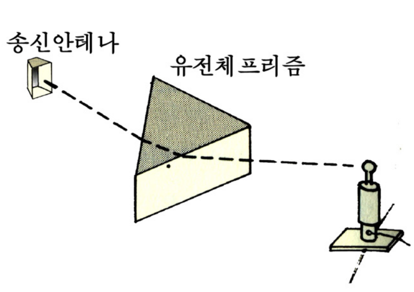


그림 33. 전자기파의 굴절관측장치

2) 초단파의 간섭현상을 관찰한다.

(1) 한개의 틈이 있는 금속판을 그림 34와 같이 설치하고 수신기를 조금씩 옮겨 갈 때 파의 세기가 커지는 자리와 그 정도를 표시하고 기록한다.

(2) 한개 실틈이 있는 금속판을 치우고 여기에 두개 실틈이 있는 금속판을 놓고 우와 마찬가지로 실험을 한다.(그림 35)

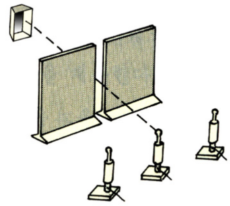


그림 34. 한개 실틈에 의한 에돌이관측장치

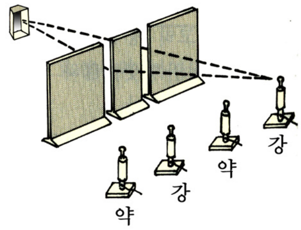


그림 35. 두개 실틈에 의한 간섭관측장치

3) 초단파의 가로파확증과 파장을 결정한다.

(1) 그림 36과 같이 금속살창을 발진기와 수신기사이에 놓고 살창을 눕혔다세웠다하면서 파의 세기를 관찰한다.

(2) 금속살창을 조금씩 발진기쪽으로 옮기면서 전자기파의 세기의 변화를 관찰하여 세기가 제일 약한 정상파의 마디들의 자리 x를 측정한다.

※ 수신부의 앞면은 금속판으로 되여있으므로 발진기에서 나온 파동은 수신기의 앞면금속판에서 반사되여 정상파를 이룬다.

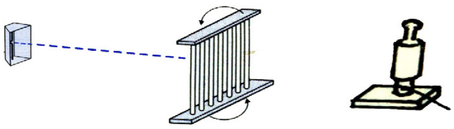


그림 36. 전자기파의 가로파확증과 파장결정

만일 수신기앞면이 금속판으로 되여있지 않다면 발진기앞에 금속판을 놓으면 된다.

결과 및 분석

1) 초단파의 반사와 굴절관측결과

(1) 입사각에 따르는 파동의 세기가 큰 반사각을 기록하고 반사법칙이 만족되는가를 따진다.

실험번호	입사각 α	반사각 β
⋮		

(2) 파라핀으로 된 3각프리즘을 통과하는 전자기파의 세기관측자료를 가지고 굴절현상을 따진다.

2) 초단파의 간섭관측결과

한개 실틈이 있는 금속판과 두개 실틈이 있는 금속판을 통과한 파의 세기관측결과를 가지고 극대자리를 표시하고 그의 세기정도를 따진다.

3) 초단파의 가로파확증과 파장결정

(1) 발진기와 수신기사이에서 금속살창을 돌릴 때 파동의 세기관측결과로부터 전자기파가 가로파인가 세로파인가를 따진다.

(2) 정상파가 이루어지는 경우 측정값을 가지고 $\lambda=2x$ 식에 의하여 파장을 결정한다.

마디사이 거리	x_1	x_2	x_3	x_4	$\cdots$	$\bar{x}$	$\lambda=2\bar{x}$

실험에서 얻은 결론과 느낀 점을 쓴다.

과 제

1. 두개 실틈에 의한 에돌이간섭에서 두 실틈사이거리를 d, 틈과 수신부사이거리를 ℓ, 파장을 λ라고 할 때 중심으로부터 수신부를 옮길 때 나타나는 극대자리를 구하는 식을 이끌어내고 실험결과와 비교하여라.
2. 송신부와 수신부사이에 금속살창을 놓고 돌리거나 움직이면 왜 파동의 세기가 약해지거나 세지는가?

콤퓨터실험 15. 각운동량의 보존에 대한 연구

목적. 이 실험에서는 회전하는 원판우에 다른 원판을 떨구었을 때 떨구기 전과 후의 계의 각속도를 측정하여 각운동량의 보존을 확증한다.

기초지식. 회전하는 물체에 외부힘모멘트가 작용하면 각운동량의 변화가 생긴다. 즉

$$M=\frac{\Delta L}{\Delta t}$$

회전하는 원판우에 질량중심이 일치하도록 어떤 원판을 떨구면 회전하는 판우에는 크기가 같고 방향이 반대인 힘모멘트가 생기므로 계에 작용하는 외부힘모멘트는 없다. 이때 각운동량의 변화가 없으므로 각운동량은 보존된다. 즉

$$L=I_1\omega_1=I_2\omega_2$$

원판의 관성모멘트는 $I=\frac{1}{2}mR^2$ 이다.

만일 돌아가는 원판우에 질량이 꼭같은 원판을 떨군다면 계의 관성모멘트는 처음관성모멘트의 2배로 된다. 회전하는 원판우에 원판을 떨구었을 때 떨구기 전과 후의 각속도를 재기 위해 회전운동수감부를 리용한다. 충돌전후의 각속도를 기록하고 분석하기 위해 실험자료분석프로그람 (Data Studio) 을 리용한다.

기구 및 재료. 콤퓨터, 콤퓨터입구결합장치, 회전운동수감부, 받침대와 고정봉, 조임쇠, 천평, 회전원판(2개)

실험방법

1) 콤퓨터설치

(1) 콤퓨터입구결합장치를 콤퓨터에 련결하고 전원을 켠다.

(2) 회전운동수감부의 련결부를 입구결합장치의 수자통로 1, 2에 련결한다.(그림 37)



그림 37. 콤퓨터입구결합장치와 수감부의 련결

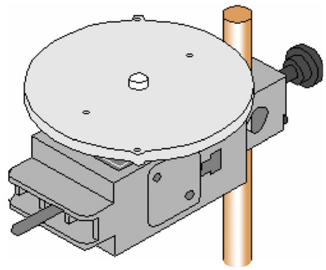
(3) 실험자료분석프로그람(Data Studio)화일을 열고 실험설치창의 수감부목록에서 회전운동수감부를 선택하고 화면에 시간에 따르는 각속도그라프와 자료표를 펼친다.

2) 수감부와 기구설치

(1) 회전운동수감부를 고정봉에 고정시킨다.

(2) 두 회전원판의 질량과 반경을 각각 측정하여 표에 기록한다.

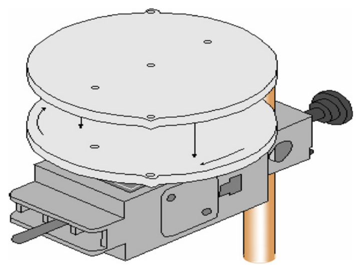
(3) 회전운동수감부의 회전축에 한개의 회전원판을 올려놓은 다음 나사를 조인다.(그림 38)


그림 38. 회전원판의 설치

3) 자료기록

(1) 손으로 원판을 돌린다. 실험설치창의 안내띠에서 시작(start)단추를 눌러 자료기록을 시작한다.

(2) 약 25개정도의 측정값들이 자료표에 기록된 후에 질량이 꼭같은 다른 원판을 돌고있는 원판우에 떨군다. 이때 두 원판의 회전축이 일치되도록 조심히 떨구어야 한다.(그림 39) 약 25개정도의 측정값들이 기록된 후 정지(stop)단추를 눌러 자료기록을 정지한다. 이때 자료목록창에 실행 1(RUN 1)이 나타나며 시간에 따르는 각속도가 그라프에 펼쳐진다.


그림 39. 회전원판우에 원판떨구기

(3) 자료기록을 3번 반복한다.

결과 및 분석

1) 원판이 떨어지기 직전과 직후의 각속도를 결정한다.

각속도그라프에서 첫 원판에 둘째 원판이 떨어지기 직전과 직후의 각속도의 값을 구하기 위해 그라프의 매 점에서의 값을 지정하는 도구 <Smart Tool>단추를 선택한다. 그리고 마우스유표를 각속도그라프의 경사진 정점과 밑점에 움직여 각속도값을 얻어내여 표에 기록한다.(그림 40)

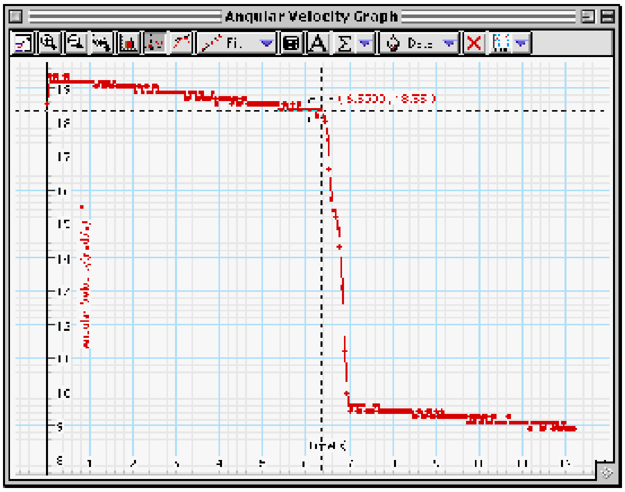


그림 40. 회전운동하는 원판의 속도그라프

실험설치창의 안내띠에서 계산<Calculate> 단추(Calculate)를 선택하여 원판을 떨구기 전과 후의 각운동량을 각각 구한다.(그림 41)

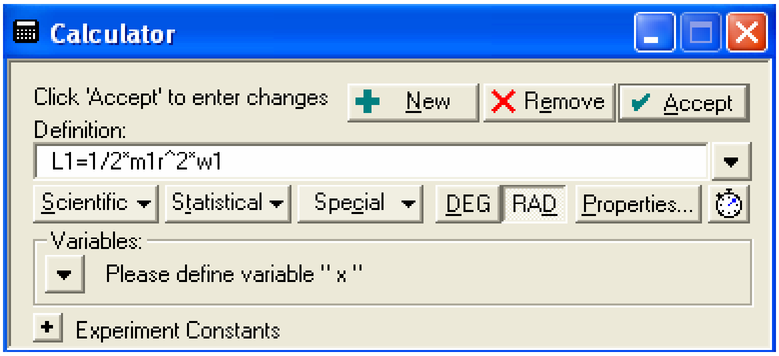


그림 41. 실험설치창에서 각운동량의 계산

2) 매 실행에 대한 우의 자료분석과정을 반복하고 그 결과를 표에 기록한다.

3) 측정자료

실험 번호	R_1 [m]	R_2 [m]	m_1 [kg]	m_2 [kg]	ω_1	ω_2	L_1	L_2
⋮								

4) 판을 떨구기 전과 후의 각운동량을 비교하고 오차원인을 밝힌다.

찾아보기

전기마당의 세기	12	electric field intensity	напряжённость электрического поля
전기상수	9	electric constant	электрическая константа
전기저항(저항)	67	electric resistance	электрическое сопротивление
전기전도도	67	electric conductivity	электропроводимость
전기진동	238	electric oscillation	электрическое колебание
전기차페	36	electric screening	электрическая защита
전기용량	46	electric capacity	электрическая ёмкость
전동력	72	electromotive force, e. m. f	электродвижущая сила, э. д. с.
전력선	16	electric line of force	электрическая силовая линия
전력선묶음	17	electric flux	поток электрической силовой лини
전류의 세기	64	current intensity	сила тока
전자기마당	312	electromagnetic field	электромагнитное поле
전자기파	312	electromagnetic wave	электромагнитная волна
전자기파의 복사	314	radiation of electromagnetic wave	излучение электромагнитных волн
전자기파의 수신	314	reception of electromagnetic wave	приём электромагнитных волн
전자기유도	125	electromagnetic induction	электромагнитная индукция
전자기유도법칙	132	law of electromagnetic induction	закон фарадея
전자선	109	electron beam, electron rays	электронные лучи
전자선관	109	Braun tube, cathode-ray tube	брауновскя трубка, электроннолучевая трубка
전하	8	charge	электрический заряд
전압	29	voltage	напряжение
전압강하	68	voltage drop	падение напряжения
전위	28	electric potential	электрический потенциал
전위차	29	potential difference	разность потенциалов
전위의 구배	33	potential gradient	градиент потенциала
전원	71	power source	источник электроэнергии
절연내압	48	disruptive voltage	пробивное напряжение
점전하	8	point charge	точечный заряд
접지	30	earth, earthing, grounding	заземление
정상전류	65	steady-state current	установившийся ток
정상파	282	stationary waves	стоячая волна
정상흐름	163	steady flow	стационарный поток
정전기마당	13	electrostatic field	электростатическое поле
정전기유도	36	electrostatic induction	электростатическая индукция

정합	84	matching	согласование
정압	169	static pressure	статическое давление
조화진동	213	harmonic vibration	гармоническое колебание
조화파동	273	harmonic wave	гармоническая волна
주기	209	period	период
주파수	209	frequency	частота
중첩의 원리	13	principle of superposition	принцип суперпозиции
쥴열	83	Joule heat	джоулева теплота
쥴의 법칙	83	Joule's law	закон Джоуля
지표파	318	ground wave	земная волна
진동	208	vibration, oscillation	колебание
진동주기	209	period of oscillation	период колебания
진동회로	240	oscillating circuit	колебательный контур
진동에네르기	218	vibrational energy	колебательная энергия
진폭	209	amplitude	амплитуда
질량중심	184	center of mass	центр массы
질점흔들이	221	pendulum of material particle	маятник материальной точки
첨단방전	38	point discharge	точечный разряд
초음파	296	ultrasonics	ультразвук
축전기	46	condenser, capacitor	конденсатор
충전	46	charge	зарядка
층흐름	165	streamline flow	ламинарное течение
큐리온도(큐리점)	44	Curie point, Curie temperature	точка Кюри
키르흐호프의 법칙	76	Kirchhoff's law	закон Кирхгофа
투자률	113	magnetic permeability	магнитная проницаемость
파동	269	wave	волна
파동매질	270	wave medium	волновая среда
파동의 간섭	278	interference of wave	интерференция волны
파동의 굴절	288	wave refraction	преломление волн
파동의 독립성	277	independence of wave	независимостъ волны
파동의 반사	288	wave reflection	отражение волн
파동의 자리각	275	phase of wave	фазовый угол волн
파동의 전파속도	272	wave velocity	скорость волны
파동의 중첩원리	277	superposition principle of wave	принцип суперпозции волны
파동의 에돌이	286	wave diffraction	дифракция волн
파면	285	wave front	фронт волны
파장	272	wavelength	длина волны
평면파	285	plane wave	плоская волна

평판축전기	47	plate condenser	листовой конденсатор
표피효과	150	skin effect	поверхностный эффект
피상전력	262	apparent power	кажущаяся мощность
호상유도	143	mutual induction	взаимная индукция
후이겐스의 원리	288	Huygens's principle	принцип Гюйгенса
행로차	279	path difference	разность хода
회리전기마당	311	vortex electric field	вихревое электрическое поле
회리전류(푸코전류)	148	eddy currents, Foucault currents	вихревые токи, токи Фуко
회전운동	185	rotation motin	вращателное движение
꿀롱힘	9	Coulomb force	Кулоновская сила
꿀롱의 법칙	8	Coulomb's law	закон Кулона
삐또관	171	Pitot tube	трубка Пито
아음파	296	subsonic wave	инфразвук
안테나	314	antenna	антенна
압력저항	178	pressure drag	сопротивление давления
압전체	42	piezoelectric	пьезоэлектрик
압전효과(피에조효과)	42	piezoelectric effect	пьезоэффект
역압전효과	43	inverse piezoelectric effect	обратный пьезоэффект
연자성체	117	soft magnetic material	магнитомягкий материал
오른손의 규칙	128	right-hand rule	правило правой руки
요소파	287	elementary wave	элементарная волна
용량저항	250	capacitive reactance	ёмкостнореактивное сопротивление
유극분자	40	polar molecule	полярная молекула
유도저항	247	induced resistance	индукцтионное сопротивление
유도전류	125	induced current	индуцированный ток
유도전하	35	induced charge	наведённый заряд
유전률	41	dielectric constant	диэлектрическая проницаемость
유전체	39	dielectric	диэлектрик
유전체의 분극	39	dielectric polarization	поляризация в диэлектрике
유효저항	246	effective resistance	активное сопротивление
유효전력	262	effective power	активная мощность
이온층	318	ionosphere	ионосфера
입사각	289	angle of incidence	угол падения
입사면	289	plane of incidence	плоскость падения
왼손의 규칙	96	left-hand rule	правило левой руки
완전저항	254	impedance	импеданс

편찬위원회

김용진, 김영인, 한성일, 강영백, 박석원,
김창선, 류해동, 윤명실

총편집 박사 부교수 리종호

물 리 (제1중학교 제5학년용)

3판

집 필 **부교수 리준호, 박사 부교수 리종호,**
리경치, 리학철, 신현철, 리홍근,
리익선, 부교수 리재섭, 고춘영

심 사 **심의위원회**

편집 및 콤퓨터편성 **리평남**

장 정 **백현민**

교 정

낸 곳 **교육도서출판사**

인쇄소 **평양고등교육도서인쇄공장**

2판발행 주체 99(2010)년 4월 12일

3판인쇄 주체 101(2012)년 월 일

3판발행 주체 101(2012)년 월 일

교-12-보-654

값 원